



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**NÁVRH SYSTÉMU PRO TESTOVÁNÍ VALIVÝCH LOŽISEK
S PROMĚNNÝMI PARAMETRY MAZÁNÍ**

DEVELOPMENT OF A TESTING SYSTEM FOR EVALUATION OF ROLLING BEARINGS WITH VARIABLE
LUBRICATION PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jozef Škoviera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jozef Škoviera**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh systému pro testování valivých ložisek s proměnnými parametry mazání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současný rozvoj diagnostických metod umožňuje rozvoj systémů prediktivní údržby, tedy údržby vycházející z monitoringu provozních podmínek a stavu tribologického uzlu. V případě implementace do systému mazání lze u konkrétních uzlů dosáhnout proaktivního řízení s očekávaným dopadem na trvanlivost tribologického uzlu.

Typ práce: vývojová - konstrukční

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavní cílem práce je navrhnout experimentální zařízení, které umožní provádět testy trvanlivosti valivých ložisek mazaných plastickým mazivem s řízeným dávkováním maziva dle diagnostických veličin.

Dílčí cíle diplomové práce:

- Navrhnout a realizovat konstrukční úpravy testovací stanice.
- Navrhnout platformu pro řízení mazání dle diagnostických veličin.
- Realizovat sérii ověřovacích experimentů s běžným intervalovým mazáním, s iniciovaným poškozením a s proaktivně řízeným mazáním.
- Vytvořit funkční vzorek řídicího systému pro další vývoj.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

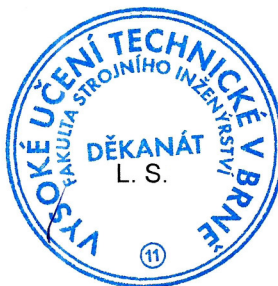
http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

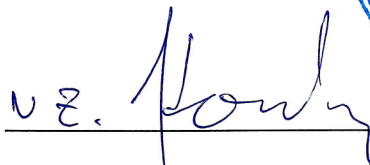
Seznam doporučené literatury:

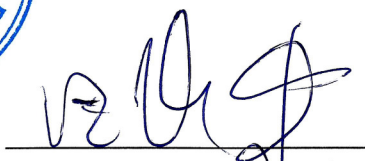
STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 07-506-7836-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016




prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Predložená diplomová práca sa zaoberá návrhom systému pre testovanie valivých ložísk, ktorý umožňuje zmeny parametrov mazania (napr. zmena domazávacieho intervalu). V práci sa čitateľ najskôr oboznámi z významom mazania valivých ložísk, z možnosťami prívodu maziva do ložiska (konkrétne zamerané na prívod plastického maziva) a možnosťami riadenia dávkovania. Následne je v práci popísaný súčasný stav experimentálnych staníc pre testovanie valivých ložísk, ktorými disponuje Ústav konštruovania. V závere prehľadu súčasného stavu poznania je taktiež spomenutá možnosť urýchlenia únavových testov. V ďalšej časti práce autor popisuje vlastné riešenie. Výsledkom sú konštrukčné úpravy experimentálnej stanice (pre možnosť domazávania plastickým mazivom), vytvorenie platformy pre riadenie mazania a vytvorenie základného programu. Súčasťou práce sú taktiež overovacie experimenty a výkresová dokumentácia.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Mazací systém, plastické mazivo, domazávanie, valivé ložisko, kontaktná únava

ABSTRACT

The presented diploma thesis deals with the design of a test system for rolling bearings, which allows the change of the lubrication parameters (e.g. changing of the relubrication interval). In the document, the reader first learns about the meaning of lubrication of rolling bearings, the possibilities of lubricant supply to the bearing (specifically for the supply of grease) and the possibilities of dosing control. Subsequently in the document is described the present state of experimental stations for testing rolling bearings, which is available at the Institute of Machine and Industrial Design. The end of the part about current state of knowledge is also mentioned the possibility of speeding up fatigue tests. In the next part, the author describes his own solution. The result is the design of an experimental station (for option to relubricate with grease), the creation of a lubrication control platform and the creation of a basic program. Part of the work is also verification experiments and drawing documentation.

KEYWORDS

Lubrication system, grease, relubrication, rolling-element bearing, contact fatigue

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠKOVIERA, J. *Návrh systému pro testování valivých ložisek s proměnnými parametry mazání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D..

T A

Č R

Tato práce vznikla v rámci řešení projektu č. TH01011136 s názvem “*Výzkum a vývoj automatického prediktivního mazacího systému*” podpořeného ze státního rozpočtu prostřednictvím programu Epsilon Technologické agentury České republiky.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že predloženú diplomovú prácu som vypracoval samostatne pod vedením Ing. Milana Omastu, Ph.D. a s využitím zdrojov, ktoré sú uvedené v zozname použitej literatúry.

V Brne dňa 19. mája 2017

.....
Jozef Škoviera

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať predovšetkým Ing. Milanovi Omastovi, Ph.D. za jeho odborné vedenie a cenné rady, ktoré mi veľmi pomohli. Ďalej by som chcel poďakovať hlavne svojej rodine, ktorá ma podporovala počas celého štúdia.

OBSAH

1 ÚVOD	15
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	16
2.1 Význam mazania valivých ložísk	16
2.1.1 Zníženie trenia a opotrebenia	16
2.1.2 Predĺženie únavovej životnosti	16
2.1.2 Odvod tepla	16
2.1.2 Ďalšie účely mazania	17
2.2 Mazanie plastickým mazivom	17
2.2.1 Domazávanie pomocou mazacieho otvoru vo vonkajšom krúžku	18
2.2.2 Domazávanie zo strany	19
2.2.3 Domazávanie zo strany pre domčeky s V-krúžkami	19
2.2.4 Cielené domazávanie zo strany	20
2.3 Automatické riadenie mazania	20
2.3.1 Princíp riadenia mazania od SKF USA INC.	21
2.3.2 Princíp riadenia mazania od Lincoln Industrial Corporation	22
2.3.3 Princíp riadenia mazania od Trico Mfg. Corporation	22
2.4 Experimentálne stanice na Ústave konstruování	23
2.5 Urýchlenie únavových testov	25
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	28
3.1 Analýza problému	28
3.2 Cieľ práce	29
4 KONCEPČNÉ RIEŠENIE	30
4.1 Návrh konštrukčných úprav testovacej stanice	30
4.1.1 Variant A	30
4.1.2 Variant B	32
4.2 Koncepčný návrh riadiaceho systému	34
5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE	36
5.1 Testovacia stanica a mazacia jednotka	36
5.1.1 Návrh testovaného ložiska	36
5.1.2 Návrh podporných ložísk	37
5.1.3 Návrh umiestnenia a domazávania testovaného ložiska	38
5.1.4 Návrh a pevnostný výpočet hriadeľa	39
5.1.5 Návrh umiestnenia podporných ložísk	42
5.1.6 Mazacia jednotka	44
5.2 Elektronika a riadiaci program	44
5.2.1 Elektronika	44
5.2.2 Riadiaci program	45
5.3 Realizácia	47
5.3.1 Zostavenie testovacia stanica	47
5.3.2 Zostavenie riadiacej elektroniky	48
5.3.3 Vytváranie preliačín	49
5.3.4 Realizácia overovacích experimentov	50
6 DISKUSIA	52
6.1 Diskusia funkčného prototypu testovacej stanice	52
6.2 Diskusia platformy pre riadenie mazania	52

6.3 Diskusia prevedených overovacích testov	54
6.3.1 Test s bežným intervalový mazaním	54
6.3.2 Testy s iniciovaným poškodením	57
6.3.3 Test s proaktívne riadeným mazaním	59
6.4 Celkové zhodnotenie funkčnosti systému	61
7 ZÁVER	62
8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	63
9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	65
9.1 Zoznam použitých skratiek	65
9.2 Zoznam použitých symbolov a veličín	65
10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	68
11 ZOZNAM TABULIEK	70
12 ZOZNAM PRÍLOH	71
PRÍLOHA 1	72
PRÍLOHA 2	73
PRÍLOHA 3	79
PRÍLOHA 4	84
PRÍLOHA 5	85

1 ÚVOD

1

Valivé ložiska sú nenahraditeľné strojné súčasti, ktoré podliehajú neustálemu procesu inovácie. Umožňujú vzájomný rotačný pohyb súčasti v strojoch, pričom súčasne prenášajú pôsobiace sily. Obvykle sa skladajú z dvoch krúžkov, valivých telies a klietky. [1]

Počas prevádzky valivého ložiska sú valivé kontakty vystavené striedavému namáhaniu pri vysokej frekvencii, ktorá vedie k únave materiálu. Únavová životnosť valivého ložiska je teda funkciou veľkosti oscilačných namáhání v kontakte. V prípade, že napätia sú nízke, únavová životnosť môže byť prakticky neobmedzená. Napätie v suchom kontakte je možné vypočítať podľa teórie elasticity, avšak povrchy sú zvyčajne mazané. V kontakte vzniká veľmi tenká vrstva mazacieho filmu (pri veľmi vysokom tlaku), ktorý oddeľuje valivé plochy. Tento tenký film zabraňuje priamemu kontaktu a hrá dôležitú úlohu pri znižovaní opotrebenia. [2]

Skúsenosti po mnohých rokoch ukazujú, že zlyhanie v dôsledku únavy pri valivých ložiskách je iba jedným z možných spôsobov zlyhania. K bežným príčinám zlyhania patrí prehriatie ložiska, nesúosovosť, nesprávna montáž, korózia, zachytené tvrdé častice a neposkytnutie vhodného mazania ložiska (olejové hladovanie alebo nepoužívanie optimálneho typu maziva). Zlyhaniu môže byť zabránené riadnou údržbou, ako je mazanie a správna montáž ložiska. [2]

Vychádzajúc z predošlých informácií je preto táto diplomová práca zameraná na návrh zariadenia pre testovanie valivých ložísk, kde má byť umožnená zmena parametrov mazania podľa aktuálnych potrieb na základe diagnostických veličín.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Pre mazanie valivých ložísk sú používané rôzne typy plastických mazív, olejov a v niektorých prípadoch aj tuhé mazivá. Väčšina ložísk je mazaná plastickým mazivom, pretože poskytuje účinné mazanie a nevyžaduje drahé systémy zásobovania. Avšak, pre vysokootáčkové zariadenia (napr. turbíny), je pre odstránenie tepla z ložiska dôležité olejové mazanie. [2]

2.1 Význam mazania valivých ložísk

Hlavným účelom mazania je zníženie trenia a opotrebenia v ložisku. V kontaktnej oblasti medzi krúžkami a valivými elementmi dochádza k valeniu a k preklzu, ktorého veľkosť závisí na druhu ložiska, zaťažení a režime mazania. U valivých ložísk nastáva za prevádzkových podmienok elastohydrodynamické mazanie, ktoré sa vyznačuje výrazným zvýšením tlaku v mazacom filme vo vnútri kontaktnej oblasti. [3]

Hlavné úlohy maziva [3]:

- zníženie trenia a opotrebenia
- predĺženie únavovej životnosti
- odvod tepla
- zabránenie vnikaniu cudzích častíc (nečistôt) do ložiska, odvod cudzích častíc z ložiska cirkuláciou oleja, ochrana povrchu ložiska proti korózii

2.1.1 Zníženie trenia a opotrebenia

Zabráneniu priameho kontaktu kov na kov medzi ložiskovými krúžkami, valivými elementmi a kietkou je prevedené pomocou mazacieho filmu. Tým sa znižuje trenie a opotrebenie v kontaktných oblastiach. [3]

Skúsenosť naznačuje, že ak je poskytnuté vhodné mazanie, tak valivé ložisko pracuje po dlhú dobu za podmienok zmiešaného mazania, pretože v praxi nie sú vždy zachované ideálne podmienky pre úplné oddelenie. Ak je výška povrchových nerovností väčšia ako mazací film, tak dôjde ku kontaktu povrchových nerovností. [2]

2.1.2 Predĺženie únavovej životnosti

Únavová životnosť ložiska je závislá najmä na viskozite¹ a na hrúbke filmu maziva medzi kontaktnými povrchmi. Za vhodných podmienok zaťaženia, viskozity a otáčok ložísk môže tento film úplne oddeliť povrchy valivých telies a obežných dráh. To vedie k značnému zlepšeniu životnosti ložiska. [2; 3]

2.1.2 Odvod tepla

Jedným z účelov mazania je ochladiť ložisko a znížiť maximálne teploty v kontakte valivého elementu a obežnej dráhy. Pre účinné chladenie by mala byť zabezpečená

¹ Viskozita je v odbornej terminológii definovaná ako miera odporu kvapaliny k tečeniu. [2]

dostatočná cirkulácia maziva na odstránenie tepla z ložiska. Najúčinnšie chladenie je dosiahnuté cirkuláciou oleja cez externý tepelný výmenník. Zvýšenie prestupu tepla z ložiska pomocou konvekcie je možné aj bez komplikovaného obehu (jednoduchý systém s olejovou vaňou). Tuhé alebo plastické mazivá nie sú efektívne pri chladení, pretože sú vhodné pre aplikácie s relatívne nízkymi otáčkami. [2]

2.1.2 Ďalšie účely mazania

2.1.4

Ďalšími účelmi mazania sú tlmenie vibrácií, ochrana proti korózií, odstránenie prachu a nečistôt opotrebenia z obežnej dráhy pomocou tekutého maziva. Plynulý EHD film hrá dôležitú úlohu ako tlmič, pretože pôsobí ako bezkontaktná podpora hriadeľa, ktorá účinne izoluje vibrácie. [2]

2.2 Mazanie plastickým mazivom

2.2

Väčšina ložísk je mazaná plastickým mazivom. Plastické mazivo má v porovnaní s olejom výhodu ľahšieho udržiavania sa v uložení ložiska (najmä u šikmých alebo zvislých hriadeľoch). Plastické mazivo taktiež prispieva k utesneniu uloženia pred pevnými alebo kvapalnými nečistotami a vlhkosťou. [4]

Množstvo plastického maziva, ktoré je použité v ložisku závisí na aplikácii. Použitie príliš malého množstva plastického maziva vedie k styku kov na kov a k predčasnej závade ložiska. Príliš veľké množstvo plastického maziva spôsobí prudký nárast prevádzkovej teploty (obzvlášť pri vysokých otáčkach). [4]

Naplnenie ložísk plastickým mazivom sa doporučuje v závislosti na rozsahu rýchlosti (viď tab. 1) [4]:

- 100% naplnenie pre pomalé rýchlosti
- (30 až 50)% naplnenie pre stredné až vysoké rýchlosti

Tab. 1 Rýchlostne rozsahy radiálnych ložísk mazaných plastickým mazivom [4]

Rýchlostný rozsah	Otáčkové číslo A [mm/min]		
	Gul'kové ložiská	Ihlové, súdkové, kuželíkové a toroidné CARB ložiská	Valčekové ložiská
Veľmi pomalý	-	< 30 000	< 30 000
Pomalý	< 100 000	< 75 000	< 75 000
Stredný	< 300 000	< 210 000	< 270 000
Vysoký	< 500 000	≥ 210 000	≥ 270 000
Veľmi vysoký	< 700 000	-	-
Mimoriadne vysoký	≥ 700 000	-	-

Výpočet otáčkového čísla A ukazuje rovnica (2.1) [4]:

$$A = n \cdot d_m \quad (2.1)$$

kde:

A	[mm/min]	je otáčkové číslo
n_i	[min ⁻¹]	– otáčky
d_m	[mm]	– stredný priemer ložiska

Stredný priemer ložiska sa spočíta podľa nasledujúcej rovnice [5]:

$$d_m = 0,5 \cdot (d_i + D_o) \quad (2.2)$$

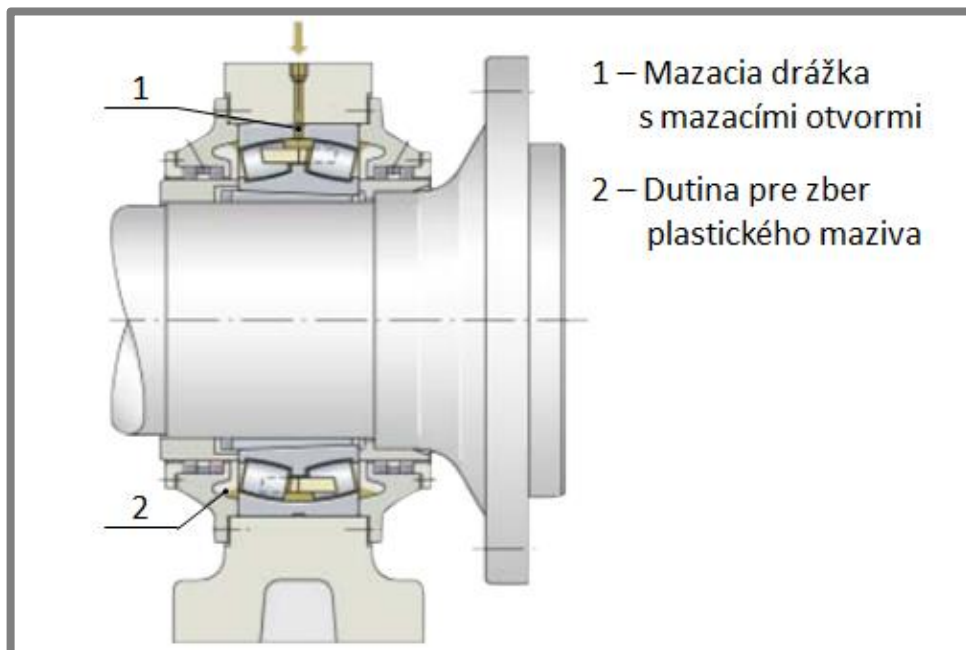
kde:

d_i	[mm]	je vnútorný priemer ložiska
D_o	[mm]	– vonkajší priemer ložiska

Čiastočne vyplnený plastickým mazivom by mal byť aj voľný priestor v ložiskovom telese. Z dôvodu, aby sa plastické mazivo malo čas v ložisku rovnomerne rozdeliť (resp. aby prebytočné mazivo mohlo z ložiska uniknúť) sa pred prevádzkou musí nechať ložisko zabehnúť. Na konci zábehu dôjde k výraznému poklesu prevádzkovej teploty. To ukazuje, že došlo k rovnomernému rozdeleniu plastického maziva v uložení ložiska. [4]

2.2.1 Domazávanie pomocou mazacieho otvoru vo vonkajšom krúžku

Mazivo je vtláčané do vnútorného priestoru ložiska cez mazaciu drážku a mazacie otvory vo vonkajšom krúžku ložiska. Tento princíp je zobrazený na obr. 2-1. Vzhľadom k priamemu a symetrickému privádzaniu maziva je dosiahnuté rovnomerné dodávanie pre oba rady valčekov. Na oboch stranách musia byť k dispozícii dostatočne veľké dutiny pre zber použitého plastického maziva alebo otvory pre únik maziva. [6]

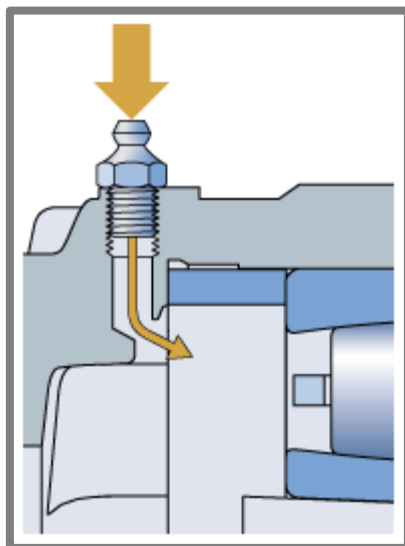


Obr. 2-1 Domazávanie pomocou mazacieho otvoru vo vonkajšom krúžku [6]

2.2.2 Domazávanie zo strany

2.2.2

Pri domazávaní zo strany, ktoré je zvyčajne nevyhnutné napr. pre naklápacie guľkové ložiská, by mal byť použitý otvor v domčeku, ktorý je posunutý do strany. Integrovaná príruha v domčeku následne vedie plastické mazivo z maznice priamo na valivé elementy (vid' obr. 2-2). [7]

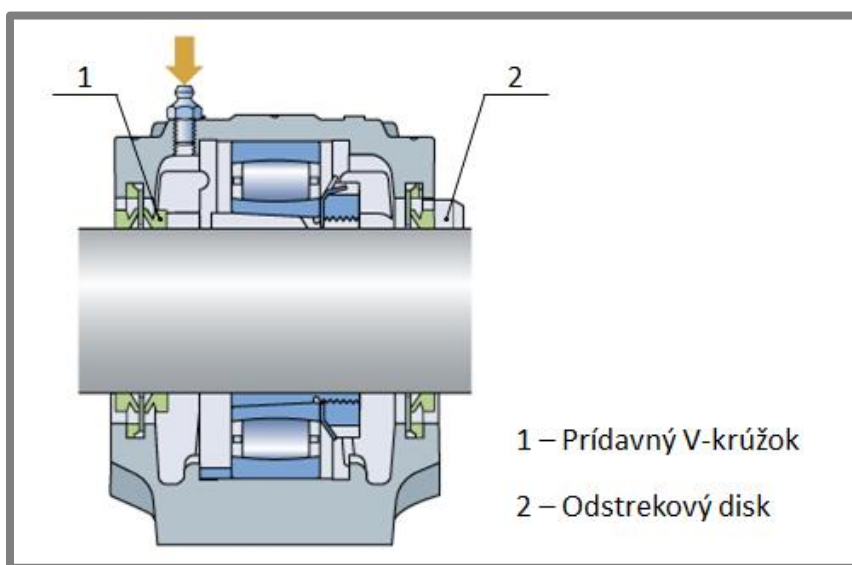


Obr. 2-2 Domazávanie zo strany [7]

2.2.3 Domazávanie zo strany pre domčeky s V-krúžkami

2.2.3

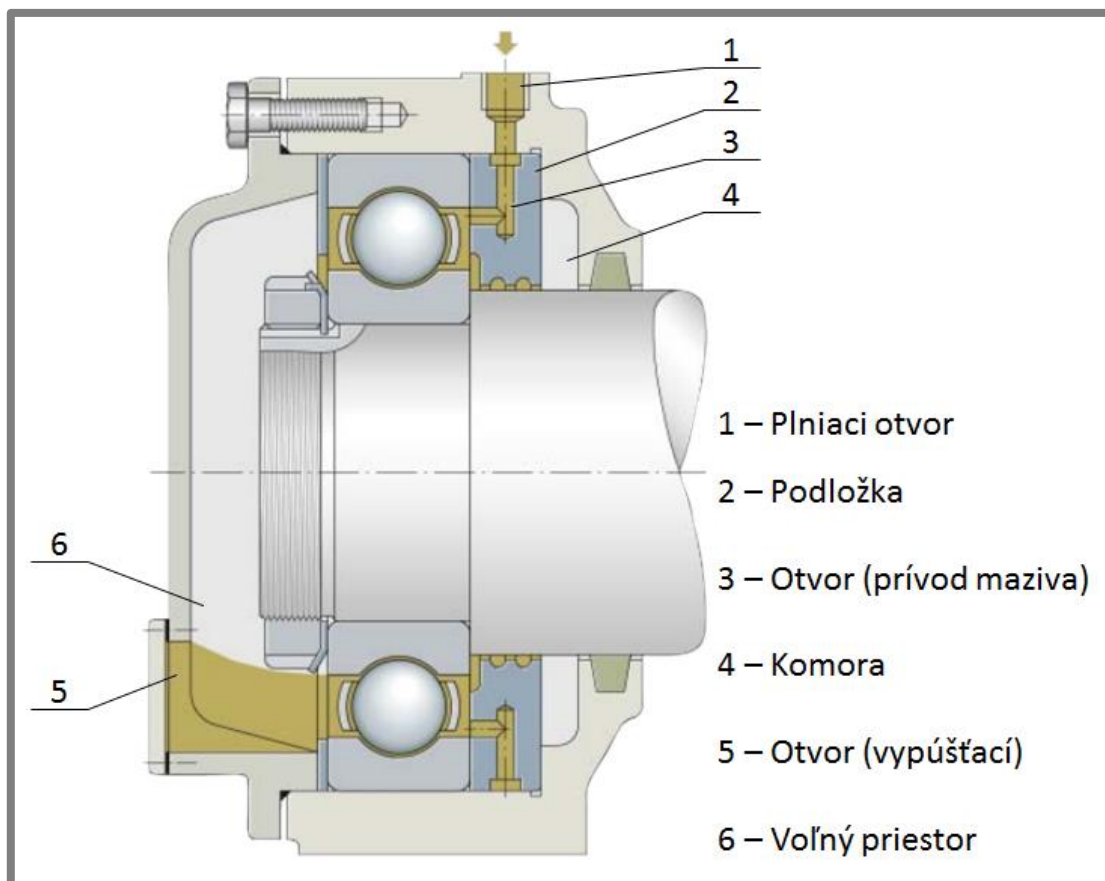
Pri domazávaní zo strany v domčekoch s V-krúžkami (vid' obr. 2-3) je potrebné namontovať dodatočný V-krúžok vo vnútri domčeku. Tento krúžok je namontovaný na strane, kde je aplikované plastické mazivo. Tým je mazivo prinútené prechádzať cez ložisko a opustiť domček na opačnej strane. [7]



Obr. 2-3 Domazávanie zo strany pre domčeky s V-krúžkami [7]

2.2.4 Cielené domazávanie zo strany

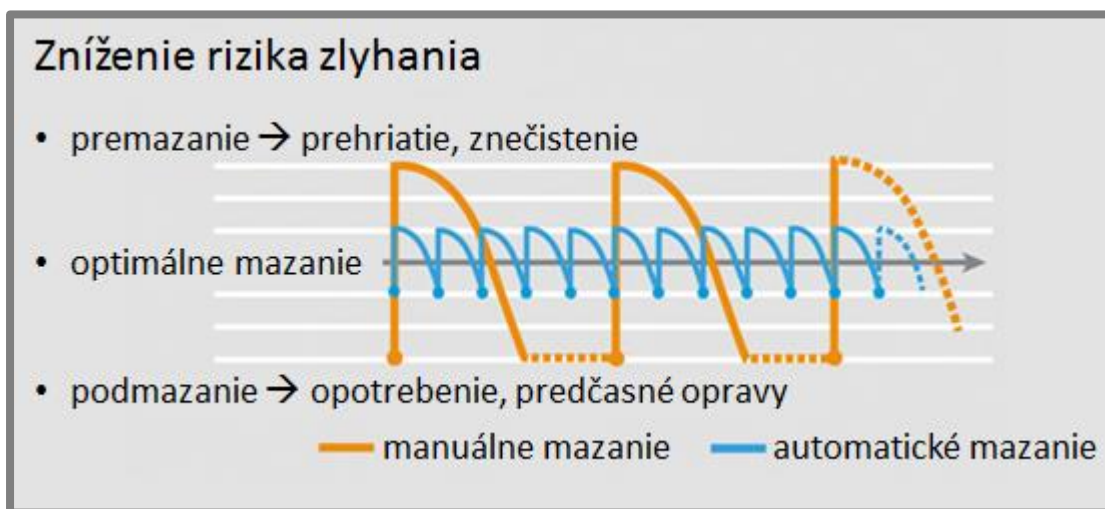
Tento princíp je znázornený na obr. 2-4. Podložka s otvormi umožňuje cielené mazanie z jednej strany. V priebehu domazávania mazivo prechádza otvorom v podložke priamo do medzery medzi kľetkou a vonkajším krúžkom. Plastické mazivo vytlačené pri domazávaní sa zhromažďuje vo voľnom priestore, ktorý musí byť čas od času vyprázdnený prostredníctvom vypúšťacieho otvoru. Komora na pravej strane ložiska je vyplnená mazivom v dobe montáže a má za cieľ zlepšiť utesnenie. [6]



Obr. 2-4 Cielené domazávanie zo strany [6]

2.3 Automatické riadenie mazania

Využívanie automatického mazacieho systému zahrňuje veľa výhod. Jednou z výhod je aj zníženie rizika zlyhania ložiska založené na základe dodania správneho množstva maziva v správny čas, vid' obr. 2-5. Domazávacie množstvá sú dané fyzickým priestorom, ktorý je v ložisku k dispozícii, pričom domazávacie intervaly sú predpísané pomocou pracovných podmienok, ktoré určujú degradáciu maziva (rýchlosť, zaťaženie, teplota, typ ložiska, atď.). [8]



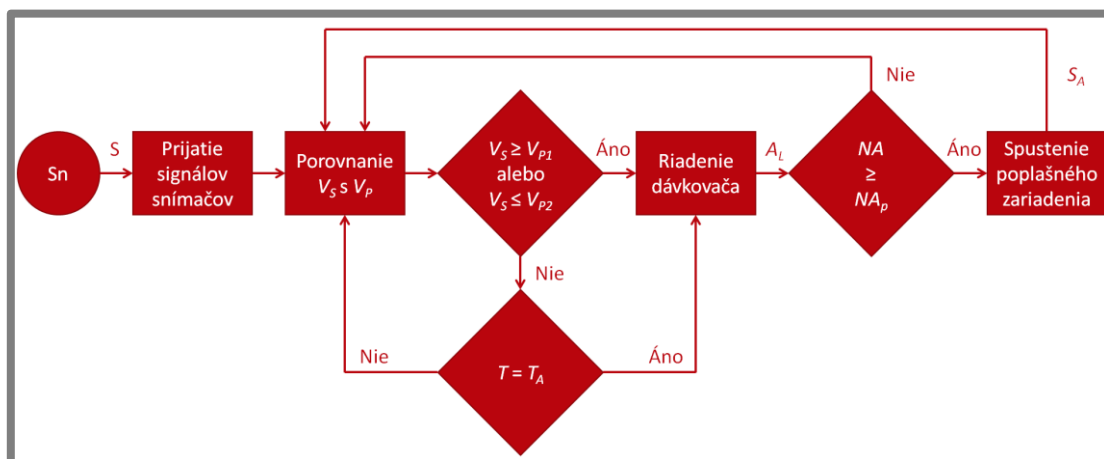
Obr. 2-5 Zníženie rizika zlyhania [8]

Na základe prevedenej rešerše boli nájdené patenty, ktoré obsahovali riadenie mazania pre ložiská. Jedná sa o patenty od SKF USA INC. [9], Lincoln Industrial Corporation [10] a Trico Mfg. Corporation [11].

2.3.1 Princíp riadenia mazania od SKF USA INC.

2.3.1

Mazací systém od SKF USA INC. [9] je vyvinutý pre mazanie ložísk veterných turbín, avšak môže byť použitý aj v iných strojoch. Princíp tohto systému je vysvetlený nižšie a znázorňuje ho obr. 2-6.



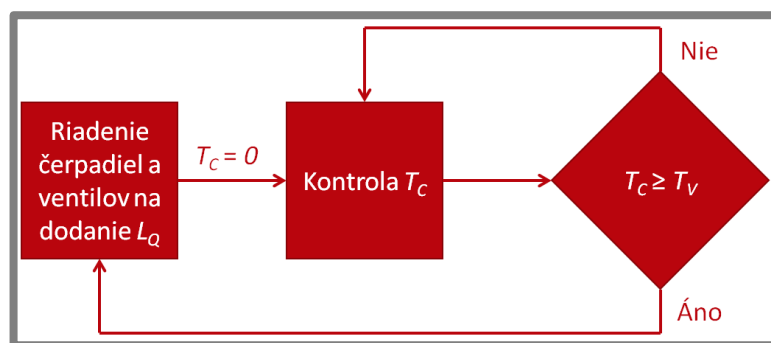
Obr. 2-6 Princíp riadenia mazacieho systému od SKF USA INC. [9]

Na základe snímačov Sn je snímaný signál S o hodnote V_S porovnávaný s vopred stanovenou prahovou hodnotou V_{P1} (resp. V_{P2}). Podmienka s prahovou hodnotou V_{P1} ($V_S \geq V_{P1}$) je používaná napr. pri snímaní vibrácií ložiska, zatiaľ čo podmienka s prahovou hodnotou V_{P2} ($V_S \leq V_{P2}$) je používaná napr. pri snímaní tlaku. Pri prekročení podmienky vyššie riadiaca jednotka signál dávkovaču, ktorý dodá množstvo maziva A_L do ložiska (napr. plastické mazivo, olej atď.). Tento proces sa opakuje kým nedôjde k zlepšeniu, alebo až do dosiahnutia limitného počtu mazaní NA_p (resp. do

prekročenia časového limitu napr. 30 minút). Pri dosiahnutí tohto počtu mazaní (resp. časového limitu) sa vyšle poplašný signál S_A , ktorý spustí poplašné zariadenie. V prípade, že podmienka s prahovou hodnotou nie je porušená, ložisko sa maže iba pri dosiahnutí časového intervalu T_A , pri ktorom sa dodá do ložiska pravidelná dávka maziva (napr. za každých 72 hodín prevádzky je dodaná do ložiska dávka 10 cm^3 maziva). [9]

2.3.2 Princíp riadenia mazania od Lincoln Industrial Corporation

Princíp mazania od Lincoln Industrial Corporation [10] nie je prednostne určený na konkrétny typ stroja ako predchádzajúci patent. Znázornenie tohto princípu je na obr. 2-7.

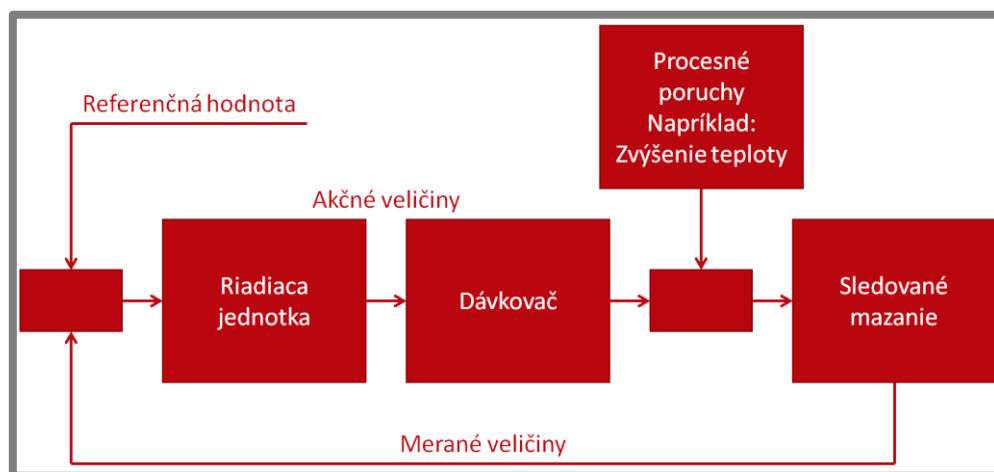


Obr. 2-7 Princíp riadenia mazania od Lincoln Industrial Corporation [10]

Riadenie funguje na princípe porovnávania doby zadržania maziva T_C a prahovej hodnoty T_V , ktorá zodpovedá efektívnej životnosti množstva maziva L_Q v domčeku. Pri prekročení prahovej hodnoty sa do domčeka dodá nové množstvo maziva (preferované je plastické mazivo). Dodaním novej dávky maziva dôjde k nahradeniu starej dávky maziva, ktorá bola v domčeku. Prahová hodnota môže byť nastavená rôznymi spôsobmi. Jednou z možností nastavenia tejto hodnoty je uloženie vopred určenej konštantnej hodnoty do elektronickej pamäte riadiacej jednotky. Druhou možnosťou je nastavenie riadiacej jednotky na určenie prahovej hodnoty založenej na predpokladanej dobe účinnosti maziva, ktorá môže byť prispôbena na základe informácií zo snímačov pre prevádzkové podmienky ložiska (otáčky ložiska, teplota ložiska, teplota maziva atď.). Taktiež môžu byť použité aj empiricky odvodené dáta uložené v pamäti riadiacej jednotky v kombinácii s informáciami so snímačov. Tieto empirické dáta môžu byť vytvorené meraním časovej doby od dodania nového maziva do ložiskového domčeka až do okamihu, pri ktorom sa určité množstvo maziva má znehodnotiť do tej miery, že je pre mazanie neúčinné, alebo účinnosť mazania má aspoň výrazný pokles. Dáta je možné vytvoriť pre rôzne kombinácie prevádzkových podmienok (napr. rôzne teploty ložiska a maziva, rôzne otáčky atď.) a pre akýkoľvek relevantný premenný prevádzkový stav alebo parameter. [10]

2.3.3 Princíp riadenia mazania od Trico Mfg. Corporation

Posledný nájdený patent je od Trico Mfg. Corporation [11]. Tento systém taktiež nie je prednostne určený na konkrétny typ stroja. Princíp tohto systému je znázornený na obr. 2-8.



Obr. 2-8 Princíp riadenia mazania od Trico Mfg. Corporation [11]

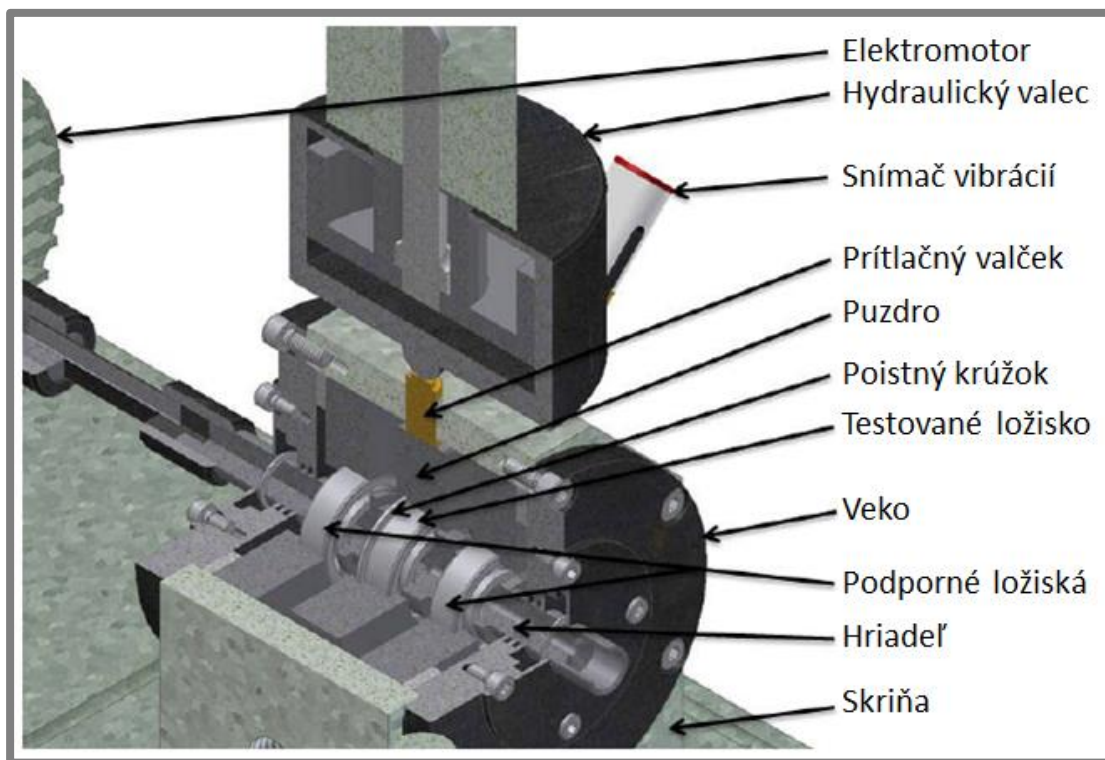
Na začiatku sa nastaví referenčná hodnota, ktorou môžu byť nominálne alebo minimálne prevádzkové parametre. Tieto prevádzkové parametre sú prednastavené z čiastkových prevádzkových požiadaviek prvkov stroja (napr. nominálne alebo minimálne prevádzkové podmienky ložiska), ktoré sú zavedené do riadiacej jednotky. Pri začatí sledovaného procesu sa overuje, že každý snímač deteguje stav meranej veličiny, ktorý je v prípustnom rozsahu. Ak každý snímač zaznamená, že jeho stav spadá do požadovaného rozsahu, tak sledovaný proces pokračuje bez pohonnej jednotky a mechanizmus dávkovača nie je uvedený do činnosti. Ak jeden alebo viac snímačov deteguje stav, ktorý nespadá do vopred stanoveného rozsahu parametrov, tak riadiaca jednotka vyšle signál do hnacej jednotky. Týmto signálom sa uvedie do pohybu hnací motor, ktorý zvýši alebo zníži množstvo dodávaného maziva (napr. olej). Sledovací proces pokračuje, akonáhle je objem maziva upravený. [11]

2.4 Experimentálne stanice na Ústave konstruování

2.4

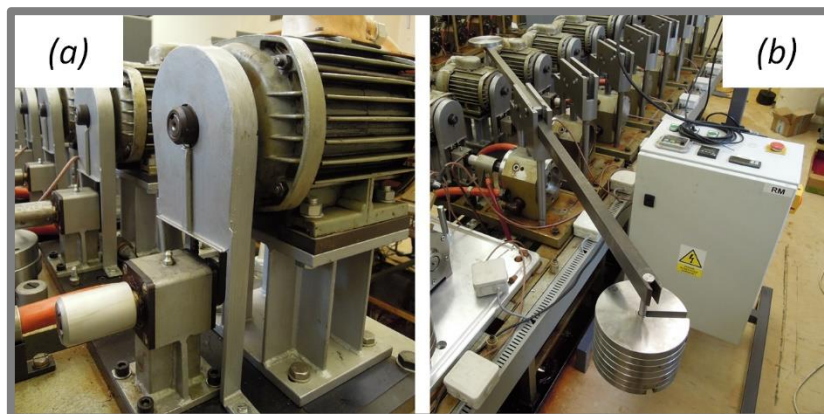
Ústav konstruování (ústav Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně), vlastní experimentálne stanice s označením SA67. Tieto stanice sú štandardne prispôsobené pre testovanie radiálnych guľôčkových ložísk s označením 6204. Táto stanica je zobrazená na obr. 2-9. Stanica sa skladá zo skrine, v ktorej sú na hriadelí a v puzdrách umiestnené ložiská (dva podporné na stranách a jedno testované uprostred). Puzdro testovaného ložiska sa na rozdiel od puzdier podporných ložísk nedotýka skrine a cez prítlačný valček prenáša radiálne zaťaženie na testované ložisko. Zaťaženie je prevedené pomocou hydraulického valca. Pootočenie puzdier je zaistené pomocou kolíka. Ten prechádza puzdrami a je zasunutý do viek, ktoré z oboch strán uzatvárajú skriňu. Pre trvanlivostné skúšky nezakrytovaných ložísk sú stanice vybavené možnosťou mazania olejovým kúpeľom. V takom prípade sú do viek dodatočne vložené tesnenia. Hriadeľ a elektromotor je spojený pomocou tenkého oceľového plechu, ktorý má chrániť elektromotor v prípade zadrenia ložiska. Stanice sú navrhnuté prevažne pre dlhodobé trvanlivostné skúšky, pri ktorých sa získavajú experimentálne dáta. Tieto dáta je následne možné porovnávať s výpočtovými predpokladmi (trvanlivosťou ložiska). Ovládanie staníc je pomocou kontrolného

panelu, ktorý umožňuje zapnutie a vypnutie staníc, zaznamenáva dobu skúšky, monitoruje hladiny vibrácií a teploty a dokáže skúšku automaticky zastaviť pri zvýšení hladiny vibrácií alebo teploty. Do stanice bola tiež zakúpená a implementovaná vibračná aparátúra, ktorá umožňuje zaznamenávať a vyhodnocovať vibračný signál v počítači, pričom je možné údaje o aktuálnom stave sledovať v reálnom čase cez internet. [12; 13]

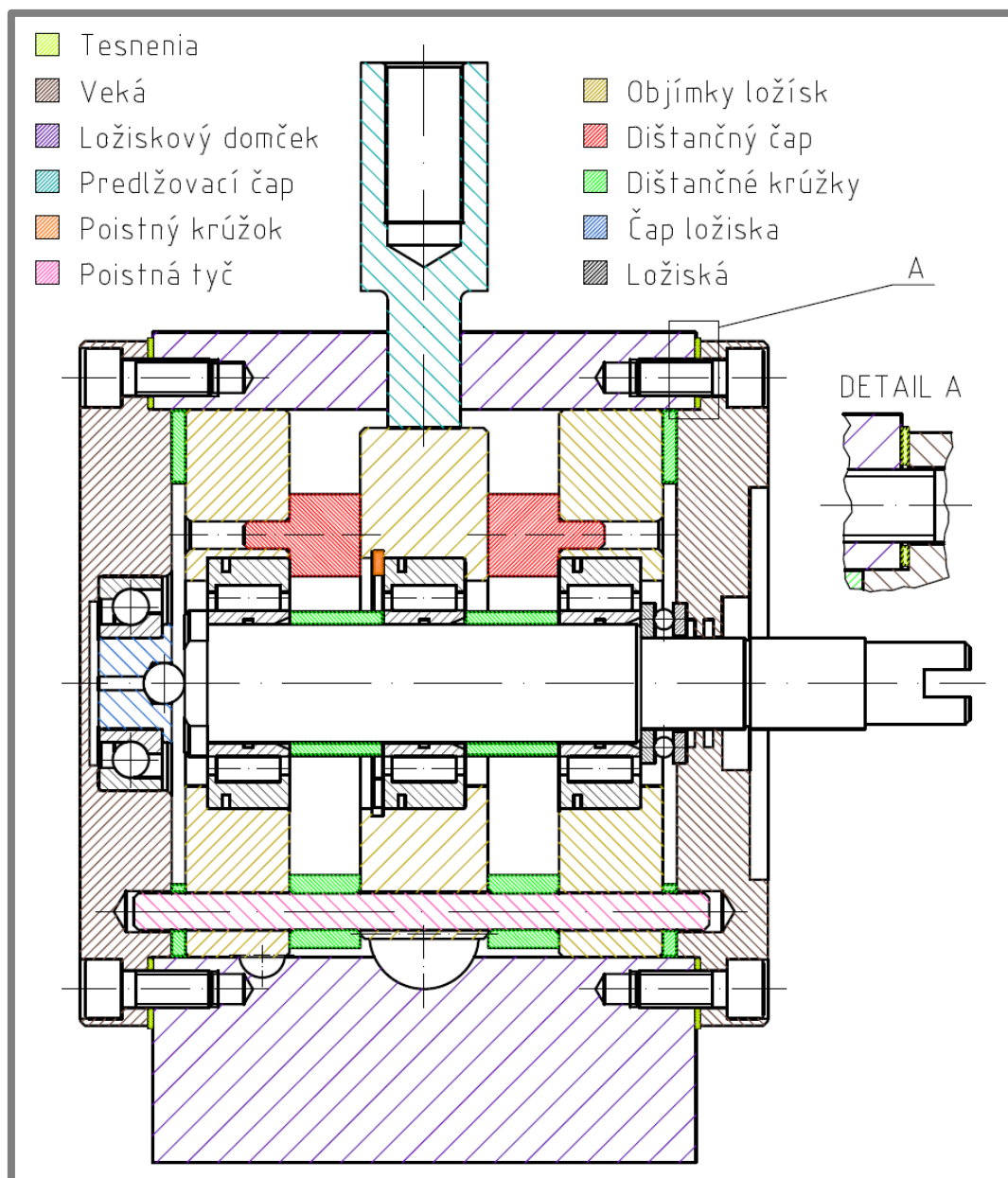


Obr. 2-9 Experimentálna stanica SA67 [13]

V neskoršej fáze boli niektoré stanice upravené pre valčekové ložiská o rozmeroch 26x55x18 mm. Upravená experimentálna stanica je znázornená na obr. 2-11. U týchto staníc taktiež došlo k sprevodovaniu otáčok pomocou remeňového prevodu (viď obr. 2-10a) a zmene systému zaťažovania (zaťažovanie pomocou pákového mechanizmu, viď obr. 2-10b).



Obr. 2-10 Sprevodovanie otáčok a zmena systému zaťažovania

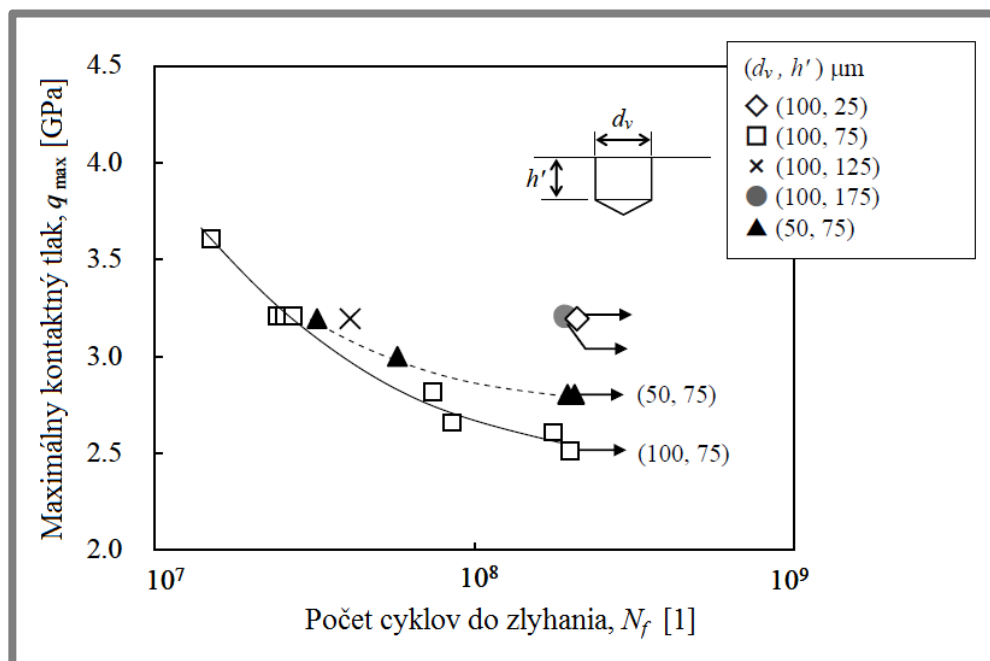


Obr. 2-11 Konštrukčné úpravy experimentálnych staníc pre valčekové ložiská

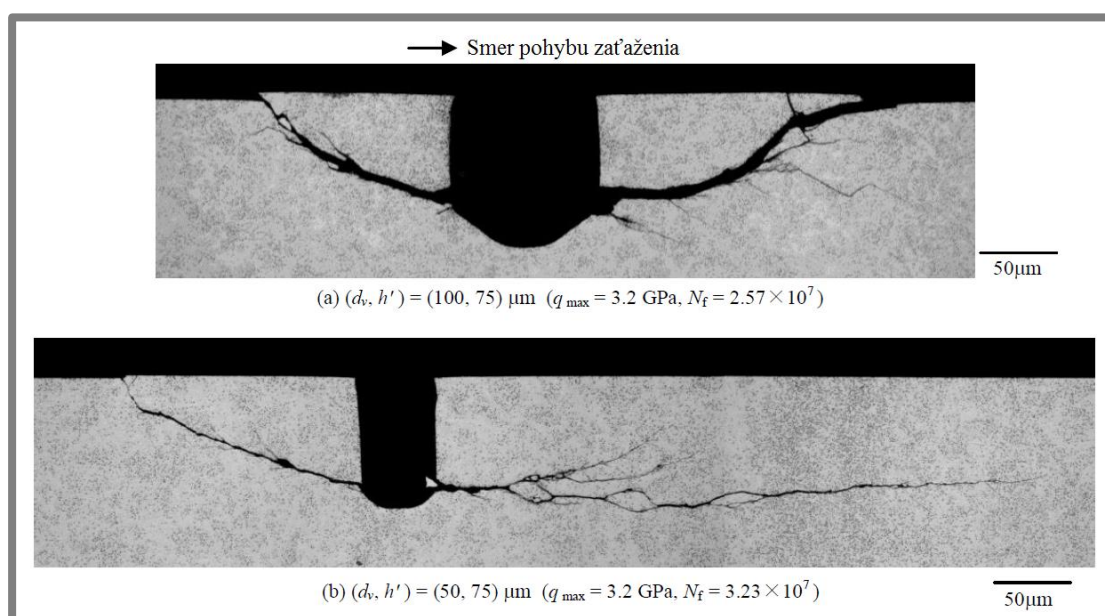
2.5 Urýchlenie únavových testov

2.5

V článku od Matsunaga a kol. [14] sa autori zaoberali vplyvom veľkosti a hĺbky malých defektov na únavovú pevnosť valivého kontaktu (konkrétne pre ložiskovú oceľ JIS-SUJ2). Na obr. 2-12 je možné vidieť závislosť maximálneho kontaktného tlaku q_{max} na počte cyklov do zlyhania N_f pre vzorkové dosky s vyvrtanými otvormi, ktoré boli testované na kontaktnú únavu. V tomto článku bolo dokázané, že priemer d_v a hĺbka diery h' značne ovplyvňuje únavovú životnosť vzoriek. Obr. 2-13 znázorňuje mikrofotografie rezov rovnobežných so smerom pohybu zaťaženia vo vzorkách, ktoré sa poškodili pod maximálnym kontaktným tlakom q_{max} (3,2 GPa). Všetky únavové trhliny sa začali šíriť z okraja dolnej časti diery.



Obr. 2-12 Závislosť maximálneho kontaktného tlaku q_{max} na počte cyklov do zlyhania N_f [14] – upravené



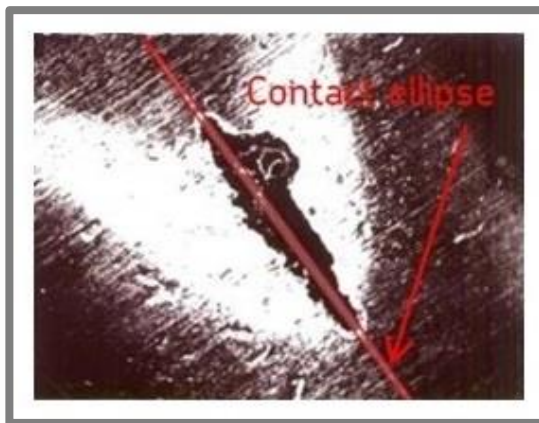
Obr. 2-13 Mikrofotografie rezov rovnobežných so smerom pohybu zaťaženia v poškodených vzorkách [14]

Morales-Espejel a Gabelli vo svojom článku [15] uvádza experimenty s umelo vytvorenými preliačninami. Jednalo sa o osem rovnomerne rozmiestnených preliačnin po obvodu vnútorného krúžku štandardných kuželikových ložísk. Preliačiny boli taktiež rozmiestnené skrz obežnú dráhu v 0,5 mm krokoch, začínajúc od okraja obežnej dráhy, avšak v tomto článku, bolo detailne písané iba o priebehu poškodenia preliačnin nachádzajúcich sa v strede obežnej dráhy. Vytvorenie týchto preliačnin bolo pomocou guľôčky z karbidu volfrámu o priemere 1 mm, ktorá bola vtláčovaná do vnútorného krúžku zaťažením o veľkosti 1250 N. To obstaralo preliačinu o priemere

400 μm , hĺbke 30 μm a zvýšenie výšky hrany približne o 2 μm . Obr. 2-14 a 2-15 ukazujú niektoré experimentálne výsledky týkajúce sa postupu spallingu preliačiny za zvyšujúceho sa počtu otáčok. Trhliny začínajú na jednej strane preliačiny a postupujú oboma smermi skrz obežnú dráhu. Pre porovnanie s finálnou trhlinou je na obr. 2-15 nakreslená približná kontaktná elipsa.



Obr. 2-14 Experimentálne výsledky šírenia trhliny z umelo vytvorenej preliačiny (po 103,5 miliónoch otáčok) [15]



Obr. 2-15 Elipsa ukazujúca približnú veľkosť Hertzovho kontaktu (po 114,7 miliónoch otáčok) [15]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3.1 Analýza problému

V predchádzajúcej kapitole bol rozobraný význam mazania valivých ložísk a následne časti (konštrukčného alebo experimentálneho charakteru), ktorými sa táto práca bude zaoberať. Jednalo sa konkrétne o možnosti prívodu plastického maziva do ložiska, princípy riadenia mazania, súčasný stav experimentálnych staníc na Ústave konštruovania a vplyv preliačín resp. otvorov na únavovú životnosť ložísk za účelom urýchlenia trvanlivostných testov.

Na základe prevedenej rešerše zo zdroju [3] je možné povedať, že hlavnou úlohou maziva je zníženie trenia a opotrebenia. To je prevedené práve pomocou mazacieho filmu ktorý vzniká medzi ložiskovými krúžkami, valivými elementmi a klietkou. Podľa informácií zo zdroju [2] môže tento film za vhodných podmienok zaťaženia, viskozity a otáčok ložísk úplne oddeliť povrchy valivých telies a obežných dráh, čím sa značne zlepšuje životnosť ložiska.

Privedenie maziva do ložiska môže byť problém, ktorý môže vznikať najmä pri domazávaní plastickým mazivom (pozn.: domazávanie plastickým mazivom je požadované pre túto diplomovú prácu, pretože je možné jednoducho meniť parametre mazania ako napr. interval mazania). Rôznymi variantmi, ako priviesť plastické mazivo do ložiska sa zaoberali zdroje [6] a [7]. Veľmi jednoduchou metódou, ako dostať plastické mazivo do ložiska, je domazávanie cez vonkajší krúžok. Použitie tejto metódy v tejto diplomovej práci však nie je možné, pretože testované ložisko bude jednoradové (nemá otvor vo vonkajšom krúžku). Z tohto dôvodu je u týchto ložísk potrebné použiť metódu, ktorá dodáva mazivo zo strany. Najvýhodnejšou metódou je použitie cieleného mazania, kde mazivo je privádzané priamo do medzery medzi klietkou a vonkajším krúžkom.

V rešeršnej časti boli taktiež spracované patentové riešenia [9], [10] a [11] zaoberajúce sa automatickým mazaním. Tieto patenty mali slúžiť ako ukážka, ktorá sa najviac približuje vízií „inteligentného“ mazacieho systému (mazanie ložiska podľa aktuálnych potrieb). Ako motivačné riešenie pre túto prácu je možné označiť patent od spoločnosti SKF [9], kde princíp je založený na základe porovnávania vopred určenej prahovej hodnoty a signálu zo snímačov. V prípade tejto diplomovej práce by sa mohlo jednať o snímanie rýchlosti vibrácií a teploty ložiska.

Na súčasný stav experimentálnych staníc, ktoré vlastní Ústave konštruovania, sa bolo potrebné pozerieť z dvoch hľadísk. Prvým hľadiskom bol typ testovaného ložiska. V tejto práci sa majú prevádzať trvanlivostné testy valivých ložísk, ktoré majú byť rozoberateľné z dôvodu vytvárania preliačín na obežnej dráhe. Z rozmerového hľadiska by sa taktiež malo jednať o ložisko, ktoré je štandardizované (štandardná rozmerová trieda ložiska). Zistené bolo, že stanice sú prispôbené pre testovanie dvoch druhov ložísk (guľôčkové ložisko 6204 a valčekové ložisko o rozmeroch 26x55x18 mm). Ani jedno ložisko však nie je vhodné pre túto diplomovú prácu, pretože ložisko je buď nerozoberateľné (guľôčkové ložisko 6204), alebo sa jedná

o ložisko ktoré je rozmerovo atypické (ložisko o rozmeroch 26x55x18 mm). Druhým hľadiskom, na ktoré sa bolo potrebné zamerať, bola možnosť spôsobu mazania testovaného ložiska. Pre túto prácu je vyžadované domazávanie testovaného ložiska pomocou plastického maziva, avšak tieto stanice sú prispôsobené na testovanie ložísk, ktoré majú trvalú náplň plastického maziva, alebo sú mazané olejom. Z tohto dôvodu bolo potrebné previesť konštrukčné úpravy.

Únavové testy valivých ložísk sú pomerne časovo náročné. Z tohto dôvodu bola taktiež v prehľade súčasného stavu poznania spracovaná podkapitola, ktorá sa zaoberá možnosťou urýchlenia týchto testov. V článku [14] je ukázaný vplyv priemeru a hĺbky dier na únavovú životnosť vzoriek a článok [15] ukazuje možnosť vytvorenia preliačín na obežnej dráhe ložiska. Na základe týchto faktov by bolo možné únavové testy urýchliť a dostať sa tak do požadovaného sledovaného štádia, kedy už je vyžadovaný zásah „inteligentného“ riadiaceho systému.

3.2 Cieľ práce

3.2

Hlavným cieľom práce je navrhnúť experimentálne zariadenie, ktoré umožní prevádzkať testy trvanlivosti valivých ložísk mazaných plastickým mazivom s riadeným dávkovaním maziva podľa diagnostických veličín.

Jednotlivé ciele diplomovej práce:

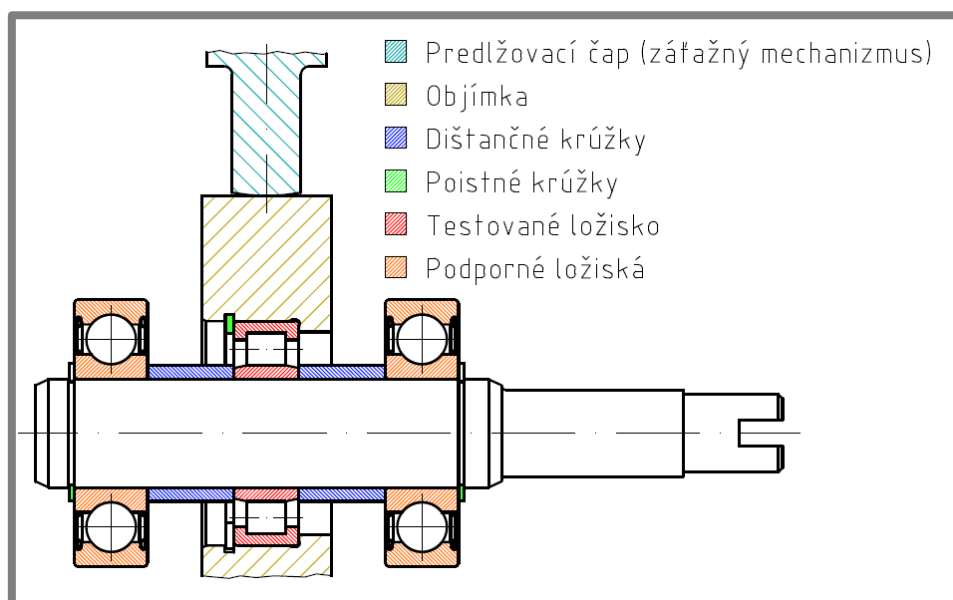
- Návrh a realizácia konštrukčných úprav testovacej stanice.
- Návrh platformy pre riadenie mazania podľa diagnostických veličín.
- Realizácia série overovacích experimentov:
 - s bežným intervalovým mazaním,
 - s iniciovaným poškodením,
 - s proaktívne riadeným mazaním.
- Vytvorenie funkčného vzorku riadiaceho systému pre ďalší vývoj.

4 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

Koncepčné riešenie je možné rozdeliť do dvoch oblastí. Prvou oblasťou je modifikácia testovacej stanice, u ktorej je potrebné navrhnuť konštrukčné úpravy tak, aby táto stanica umožňovala domazávanie pomocou plastického maziva. Druhou oblasťou je návrh platformy pre riadenia mazania podľa diagnostických veličín. V tomto prípade je potrebné určiť hardvérovú a softvérovú časť riadiaceho systému.

4.1 Návrh konštrukčných úprav testovacej stanice

Z hľadiska koncepcného riešenia zostal princíp rovnaký ako aj u predchádzajúceho riešenia, vid' obr. 4-1. Testované ložisko je na hriadeli umiestnené medzi podpornými ložiskami a je zaťažované pomocou záťažného mechanizmu prostredníctvom objímky.



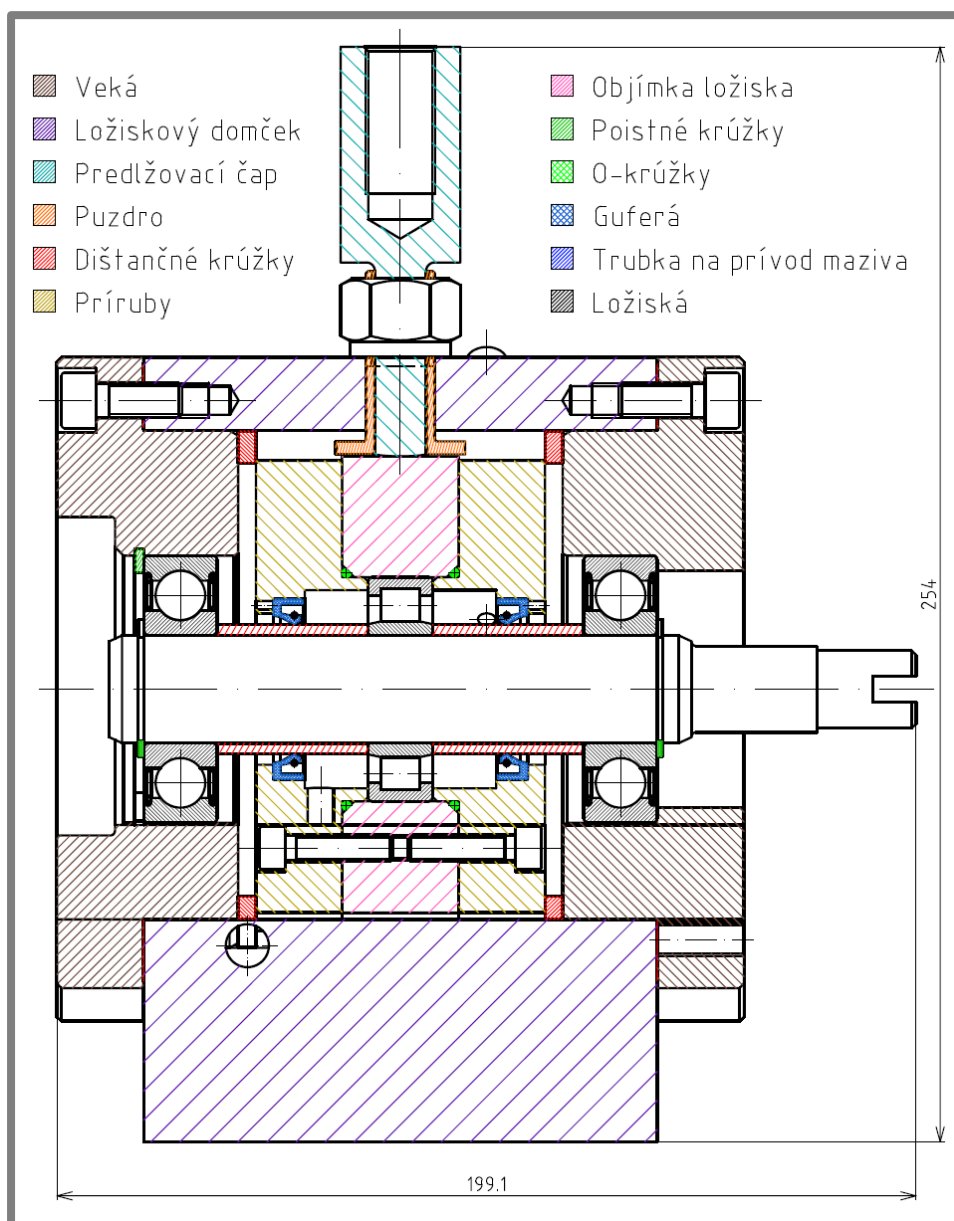
Obr. 4-1 Koncepčné riešenie

Hlavné konštrukčné úpravy, ktoré bolo potrebné previesť, pozostávali z prispôsobenia dielov pre vybrané typy ložísk a návrhu prívodu plastického maziva k testovanému ložisku. K týmto konštrukčným úpravám boli pridané aj ďalšie úpravy pre jednotlivé varianty podľa ich potrieb.

4.1.1 Variant A

Vo variante A (vid' obr. 4-2 a 4-3) je testované ložisko uložené v objímke, do ktorej sú z oboch strán priskrutkované príruby. V príрубе naľavo je vyvŕtaný otvor pre prívod maziva a následne v príрубе napravo je vyvŕtaný otvor pre odvod maziva. Utesnenie týchto prírub je prevedené pomocou Gufer (medzi prírubou a dištančným krúžkom na hriadeli) a pomocou O-krúžkov (medzi prírubou a objímkou). Zaistenie objímky proti pootočeniu je prevedené pomocou puzdra, v ktorom je vedený predĺžovací čap záťažného mechanizmu. Zaťaženie sa prenáša pomocou kontaktu

predlžovacieho čapu a rovinnej plochy objímky. Poloha objímky je vymedzená pomocou dištančných krúžkov (dištančné krúžky medzi prírubami a vekami).

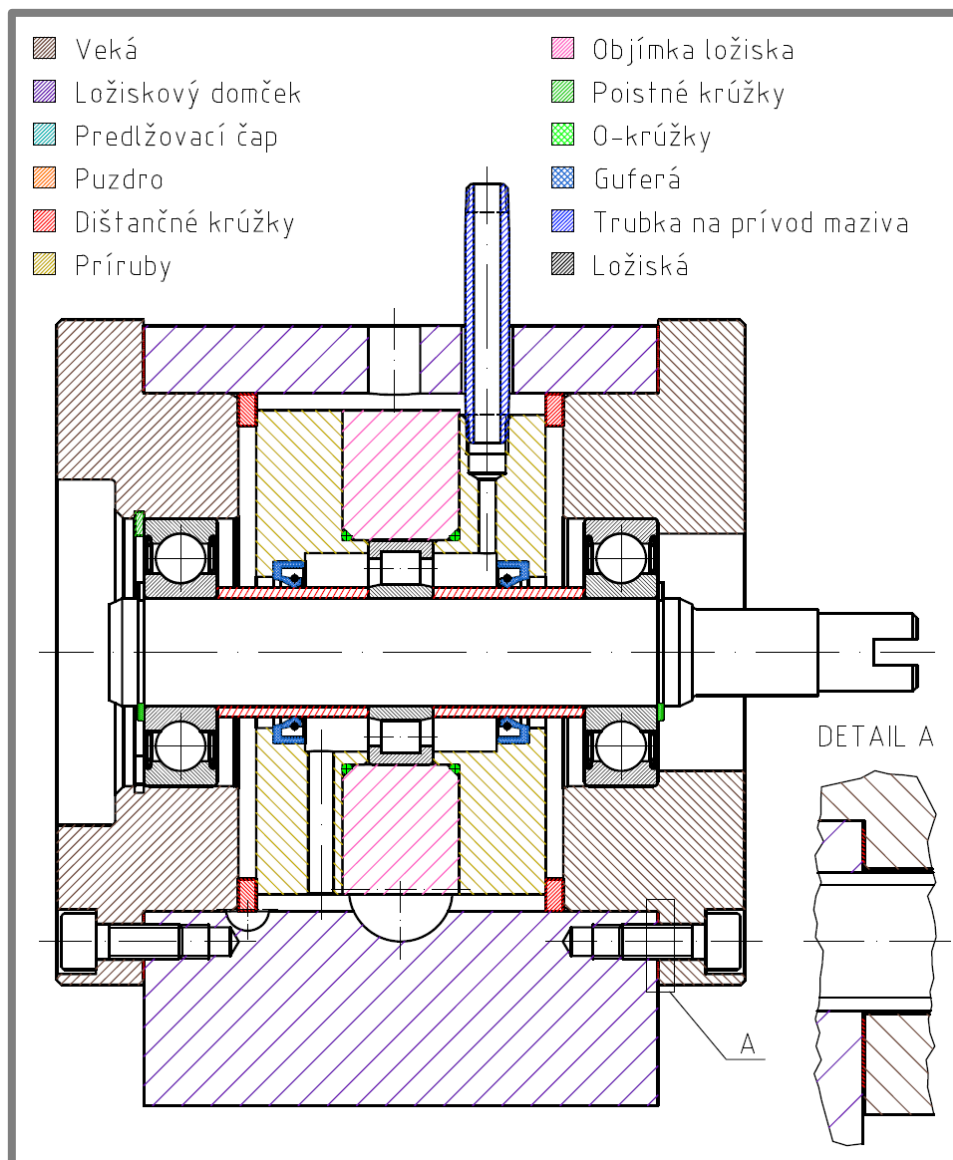


Obr. 4-2 Koncepčný návrh experimentálnej stanice – Variant A, Rez A

Jednalo sa o prvotný návrh, ktorý však nie je vhodný a to z nasledujúcich dôvodov:

- Zaistenie pootočenia objímky pomocou puzdra umožňuje pootočenie v závislosti od presnosti jeho montáže.
- Mazivo je privádzané do značne veľkého priestoru (nutnosť vyplniť tento vzniknutý priestor mazivom).
- Utesnenie priestoru za ložiskom nie je nutné (postačujúci len odvod maziva).

- Vŕtanie diery pre prívod maziva v oblasti, kde to nie je možné (v oblasti sa nachádzajú iné diery, s ktorými by sa nová diera čiastočne prekrývala).
- Možný prenos síl prostredníctvom trenia príruby a dištančného krúžku, čím môže dôjsť k zníženiu zaťaženia testovaného ložiska.
- Vymedzenie podporných ložísk je prevedené pomocou poistného krúžku (neumožňuje prípadné doladenie vôle napr. z dôvodu tepelnej rozťažnosti).

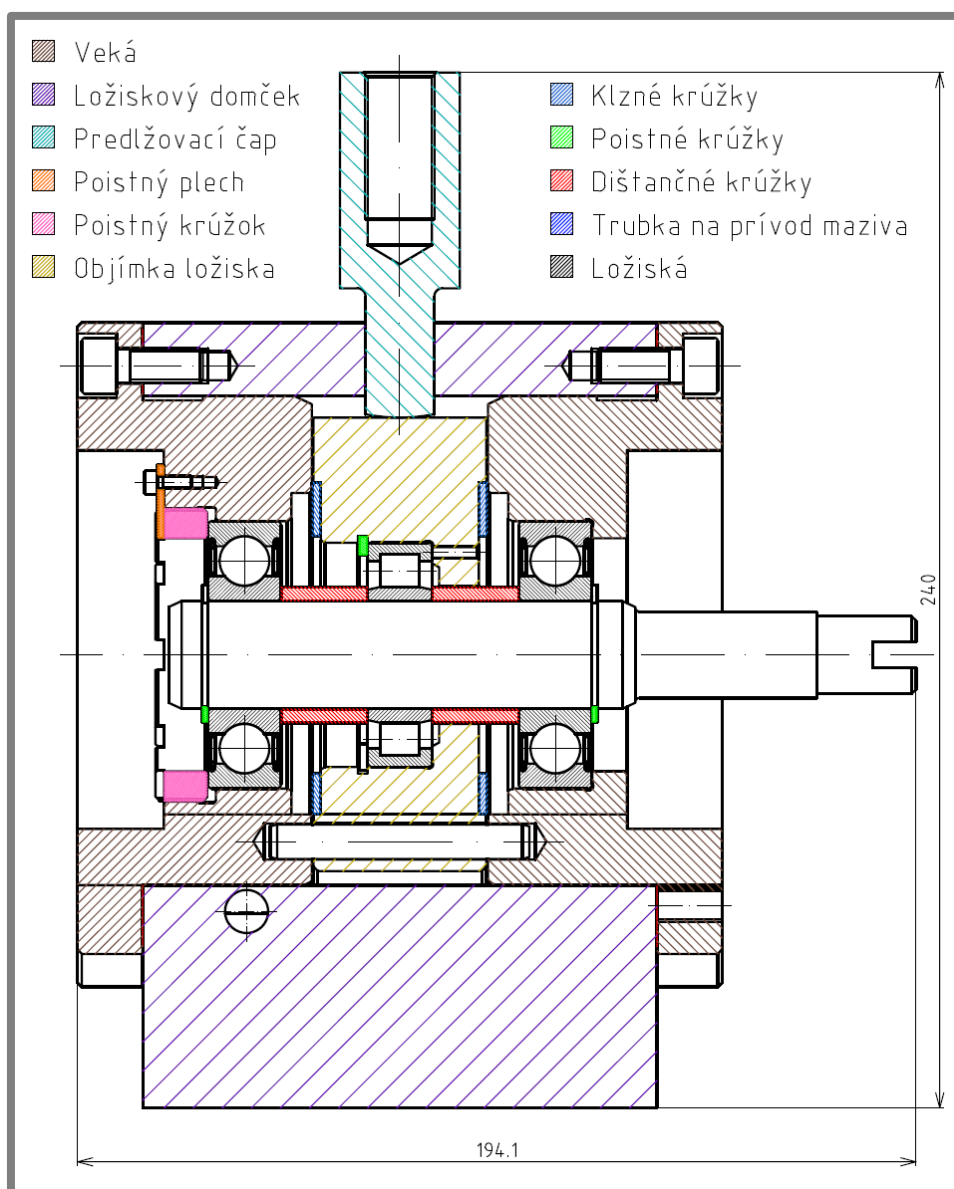


Obr. 4-3 Konceptný návrh experimentálnej stanice – Variant A, Rez B

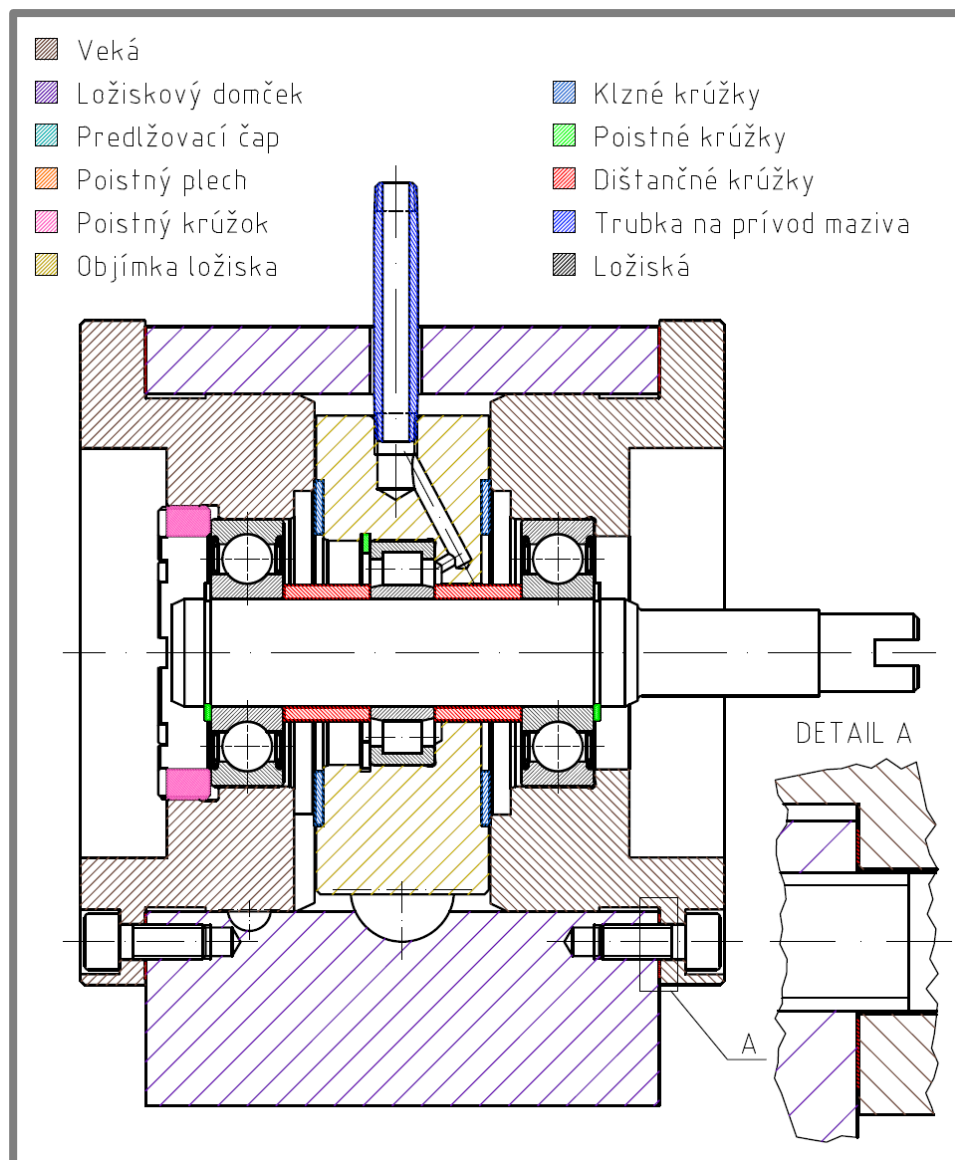
4.1.2 Variant B

Na základe zhodnotenia variantu A bol zostavený variant B, ktorý je znázornený na obr. 4-3 a 4-4. Testované ložisko je uložené v objímke, ktorá z jednej strany minimalizuje voľný priestor z dôvodu zamedzenia úniku plastického maziva (malá vôľa medzi

objímkou a dištančným krúžkom na strane prívodu maziva). Použitím tejto objímky bol taktiež minimalizovaný priestor, ktorý je potrebné vyplniť mazivom. Prívod maziva do tohto priestoru je prevedený pomocou otvoru, ktorý sa v domčeku už nachádzal a následného vyvrtaného vedenia v objímke. Odvod maziva je riešený pomocou vyfrézovanej drážky do veka, ktorá umožňuje mazivu dostať sa k odtokovému otvoru (viď spodná časť ľavého veka na obr. 4-5). Pootočeniu objímky je zamedzené pomocou voľne uloženého kolíku, ktorý stanovuje polohu objímky voči vekám. Na bočných stranách objímky sa nachádzajú krúžky s klznou vrstvou (PTFE). Tieto krúžky majú za úlohu v prípade kontaktu s vekom minimalizovať trenie, ktoré by vznikalo medzi objímkou a vekami a znížiť tak stratu zaťaženia testovaného ložiska. Vymedzenie podporných ložísk je prevedené pomocou poistného závitového krúžku, ktorý je zaskrutkovaný do ľavého veka (umožnenie nastavenia vôle v závislosti na pootočení poistného závitového krúžku). Tento krúžok je poistený proti samovoľnému pootočeniu pomocou poistného plechu a skrutky.



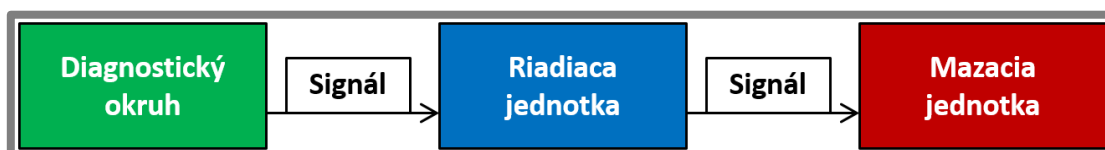
Obr. 4-4 Konceptný návrh experimentálnej stanice – Variant B, Rez A



Obr. 4-5 Konceptný návrh experimentálnej stanice – Variant B, Rez B

4.2 Konceptný návrh riadiaceho systému

Technické riešenie riadiaceho systému zahŕňa výber programovacieho prostredia a všetkých hardvérových komponent potrebných pre vytvorenie riadenia. V dnešnej dobe je na výber z veľkého množstva programovacích prostredí. Z hľadiska základného princípu je potrebné, aby programovacie prostredie súčasne dokázalo prijímať informácie o stave ložiska z diagnostického okruhu a následne aby dokázalo riadiť mazaciu jednotku, viď obr. 4-6.



Obr. 4-6 Základný princíp riadenia

Stav ložiska je monitorovaný pomocou snímača (snímanie teploty a vibrácií) privedeného na vonkajší krúžok testovaného ložiska. Tieto dáta sú následne posielané do osemkanálového digitálneho prístroja pre meranie a vyhodnocovanie vibrácií, teploty a kondície ložiska rotačných strojov od spoločnosti Viditech (jednotka z označením Viditech 2000CV) [16]. Táto monitorovacia jednotka obsahuje prúdové výstupy (4 – 20) mA, ktoré je možné použiť na privedenie signálu do riadiacej jednotky (privedenie signálu do riadiacej jednotky je však možné až po prevedení na napäťový signál).

Vychádzajúc z informácií o tejto monitorovacej jednotke, skúseností a technického vybavenia, boli uvažované nasledujúce dve možnosti programovacieho prostredia:

- Arduino
- LabVIEW

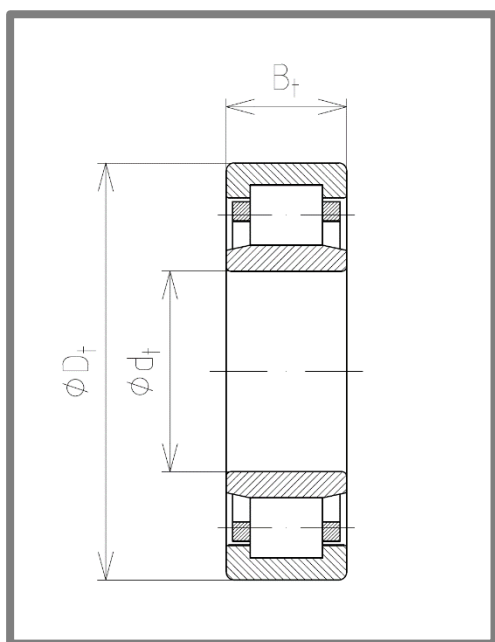
Vzhľadom k dostupnému technickému vybaveniu a univerzálnosti programovacieho jazyka sa pre vývoj javí LabVIEW ako lepšie riešenie. Riadenie by prebiehalo na základe počítača, ku ktorému je potrebné dokúpiť iba hardvér, ktorý je potrebný na privedenie signálu z monitorovacej jednotky a na následné riadenie mazacej jednotky.

5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

5.1 Testovacia stanica a mazacia jednotka

5.1.1 Návrh testovaného ložiska

Návrh testovaného ložiska spočíval v hľadaní rozoberateľného ložiska (z dôvodu vytvárania počiatočného poškodenia ložiska) s nízkou základnou dynamickou únosnosťou (z dôvodu nízkej trvanlivosti ložiska). Ďalším požadovaným parametrom bol priemer otvoru vnútorného krúžku ložiska o veľkosti 25 mm. Na základe týchto požadovaných parametrov bolo nájdené valčekové ložisko NU 205 ECP [17]. Ložisko je zobrazené na obr. 5-1 a základné údaje o tomto ložisku sú uvedené v tab. 2.



Obr. 5-1 Ložisko NU 205 ECP [17] – upravené

Tab. 2 Základné údaje ložiska NU 205 ECP [17]

Rozmer	Veľkosť [mm]
ϕd_t	25
ϕD_t	52
B_t	15
Veličina	Veľkosť [kN]
Základná dynamická únosnosť C	32,5

Trvanlivosť ložiska bola vypočítaná podľa modifikovanej rovnice trvanlivosti, ktorú uvádza SKF [18], vid' rovnica (5.1). Samotný výpočet znázorňuje rovnica (5.2).

$$L_{nmh} = a_1 \cdot a_{skf} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n_i} \quad (5.1)$$

kde:

L_{nmh}	[hod]	je trvanlivosť podľa SKF (pri 100 – n % spoľahlivosti)
a_1	[1]	– súčiniteľ spoľahlivosti
a_{skf}	[1]	– súčiniteľ trvanlivosti podľa SKF
C	[kN]	– základná dynamická únosnosť
P	[kN]	– ekvivalentné dynamické zaťaženie ložiska

- p [1] – exponent rovnice trvanlivosti
- 3 pre ložiská s bodovým stykom
 - 10/3 pre ložiská s čiarovým stykom

$$L_{10mh} = 1 \cdot 1,55 \cdot \left(\frac{32,5 \text{ kN}}{10 \text{ kN}} \right)^{\frac{10}{3}} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 4200 \text{ min}^{-1}} \quad (5.2)$$

$$L_{10mh} = 312,76 \text{ hod} \cong 13 \text{ dní}$$

kde:

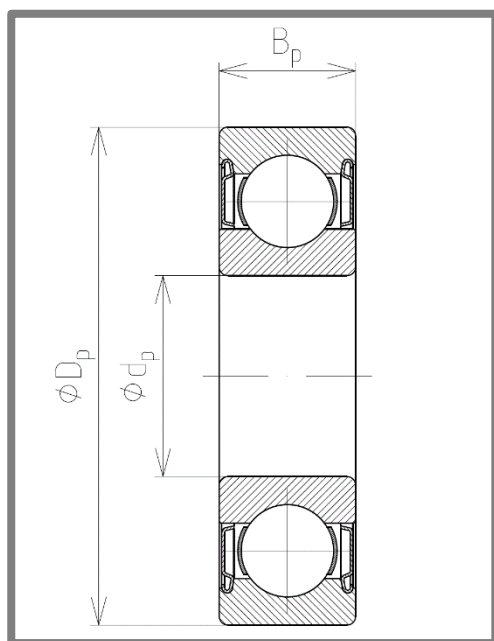
L_{10mh} [hod] je trvanlivosť podľa SKF (pri 90 % spoľahlivosti)

Pozn.: Zaťaženie ložiska 10 kN bolo zvolené ako nominálne (v prevedených testoch sa toto zaťaženie môže mierne líšiť).

5.1.2 Návrh podporných ložísk

5.1.2

Podporné ložiská bolo potrebné navrhnuť tak, aby trvanlivosť týchto ložísk bola vyššia ako u testovaného ložiska. Dôraz u týchto ložísk bol kladený taktiež aj na prípadné zachytenie axiálnych síl. Ďalším požadovaným parametrom bol priemer otvoru vnútorného krúžku ložiska, ktorý taktiež ako aj u testovaného ložiska mal mať veľkosť 25 mm. Na základe týchto požadovaných parametrov bolo nájdené guľôčkové ložisko 6305-2Z [19]. Ložisko je zobrazené na obr. 5-2 a základné údaje o tomto ložisku sú uvedené v tab. 3.



Obr. 5-2 Ložisko 6305-2Z [19] – upravené

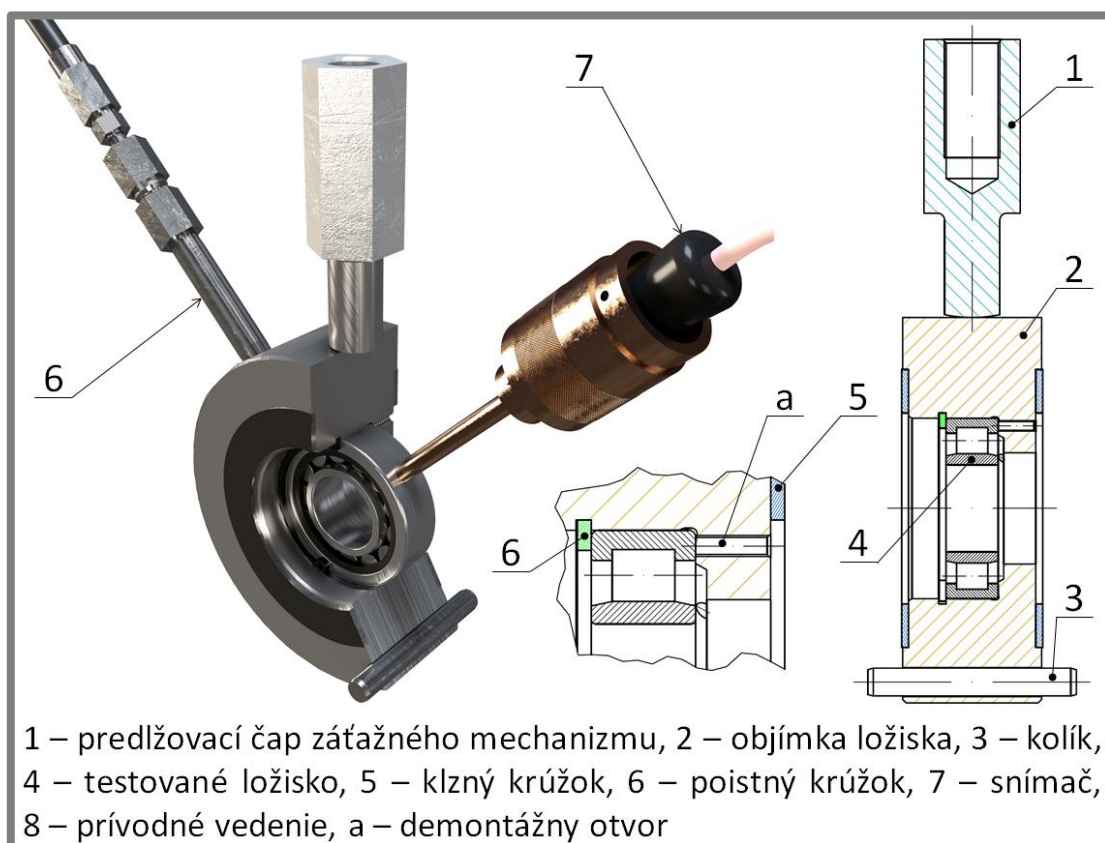
Tab. 3 Základné údaje ložiska 6305-2Z [19]

Rozmer	Veľkosť [mm]
ϕd_p	25
ϕD_p	62
B_p	17
Veličina	Veľkosť [kN]
Základná dynamická únosnosť C	23,4

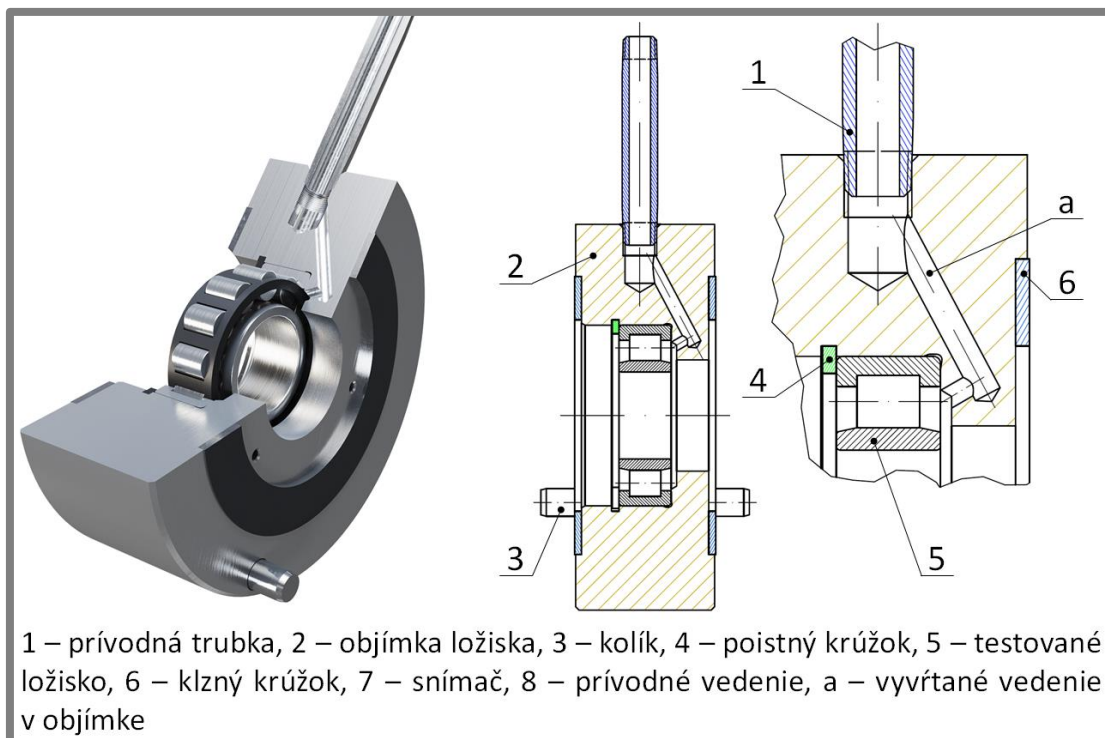
Trvanlivosť tohto ložiska bola vypočítaná pomocou internetovej aplikácie SKF Bearing Calculator [20] a vychádza na 1630 hod (približne 68 dní). Vstupné parametre a výsledné hodnoty sú uvedené v prílohe 1.

5.1.3 Návrh umiestnenia a domazávania testovaného ložiska

Testované ložisko je umiestnené uprostred objímky, vid' obr. 5-3 a 5-4. Axiálne posunutie ložiska v tejto objímke je zamedzené pomocou poistného krúžku. Pootočeniu ložiska taktiež nie je umožnené, pretože vonkajší krúžok ložiska je po obvode prilepený k objímke. Objímka je zaistená proti pootočeniu pomocou voľne uloženého kolíku v spodnej časti. Tento kolík určuje vzájomnú polohu medzi objímkou a vekami, čím zabezpečuje správnu polohu vrchnej rovinnej plochy, ktorá slúži na zaťažovanie. Tým je taktiež zabezpečená aj poloha otvoru pre prívod plastického maziva. Domazávanie je prevedené pomocou prívodného vedenia končiaceho trubkou, ktorá je zaskrutkovaná do objímky a následného vyvítaného vedenia v objímke, ktoré vedie mazivo k bočnej strane ložiska (vid' detail na obr. 5-4). Mazivo je následné vďaka predĺženej bočnej stene objímky nútené postupovať cez ložisko. Z hľadiska demontáže ložiska sa na tejto bočnej stene objímky nachádzajú tri závitové otvory, pomocou ktorých je možné ložisko z objímky vytlačiť (vid' detail na obr. 5-3). Posledný otvor na obvodovej ploche objímky je určený pre snímač, ktorý sa privedie na obvodovú plochu vonkajšieho krúžku testovaného ložiska. Vymedzenie objímky v axiálnom smere je prevedené pomocou prilepených krúžkov s klznou vrstvou (PTFE). Tieto krúžky sa nachádzajú na bočných stranách objímky a v prípade kontaktu s vekom majú za úlohu minimalizovať trenie, ktoré by vznikalo medzi objímkou a vekom a znížiť tak stratu zaťaženia testovaného ložiska.



Obr. 5-3 Umiestnenie testovaného ložiska



Obr. 5-4 Spôsob domazávania testovaného ložiska

5.1.4 Návrh a pevnostný výpočet hriadeľa

5.1.4

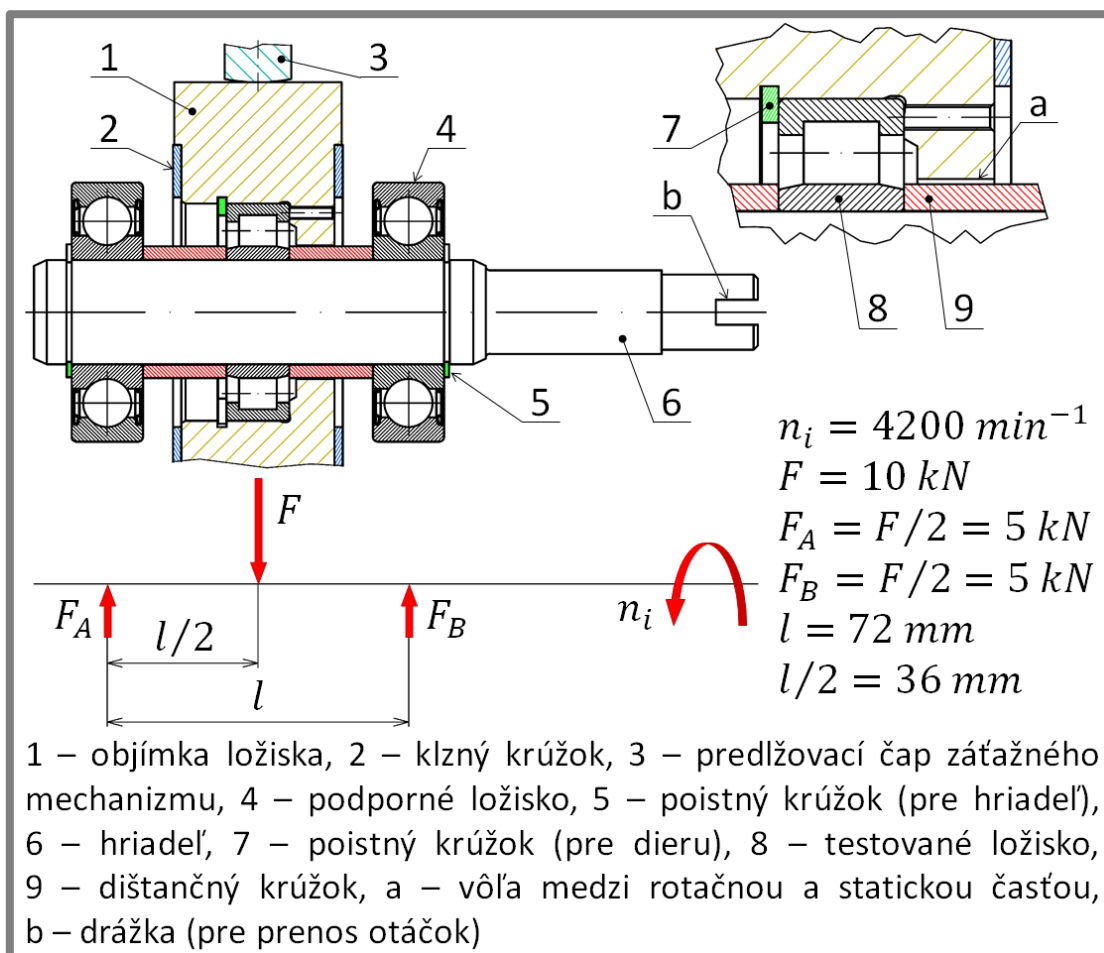
Hriadeľ (vid' obr. 5-5) je navrhnutý na základe rozmerov testovaného ložiska a podporných ložisk. Vnútny krúžok testovaného ložiska je na hriadeľ nalisovaný a nachádza sa v strede zaťažovanej oblasti. Po pridaní objímky zo zvyšnou časťou testovaného ložiska sú následne na hriadeľ nalisované podporné ložiská. Tieto ložiská sú symetricky odsadené od testovaného ložiska pomocou dištančných krúžkov a proti axiálnemu posunutiu sú poistené pomocou poistných krúžkov. Medzi dištančným krúžkom a bočnou stenou objímky, ktorá má prinútiť prechádzať mazivo cez testované ložisko, sa nachádza malá vôľa zabráňujúca kontaktu rotačných a statických súčastí (vid' detail na obr. 5-5). Táto vôľa bola navrhnutá tak, aby nedochádzalo k jej vymedzeniu (na základe výpočtu veľkosti maximálneho priehybu hriadeľa [21]). Tento výpočet je uvedený v rovnici (5.3). Hriadeľ bol taktiež skontrolovaný z hľadiska medzného stavu pružnosti a medzného stavu únavy. U týchto výpočtov bolo počítané iba z hlavnou dominantnou zložkou namáhania, ktorou bol ohyb. Namáhanie na krut bolo zanedbané z dôvodu, že sa jedná iba o trenie v ložiskách. V pevnostných výpočtoch boli použité mechanické vlastnosti ocele 16MnCr5 [22], ktoré sú uvedené v tab. 4.

$$w = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{64}} \quad (5.3)$$

$$w = \frac{10 \text{ kN} \cdot (72 \text{ mm})^3}{48 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot \frac{\pi \cdot (25 \text{ mm})^4}{64}} = 0,0193 \text{ mm} < \text{vôľa} = 0,25 \text{ mm}$$

kde:

w	[mm]	je maximálny priehyb hriadeľa
F	[kN]	– zaťažujúca sila
l	[mm]	– funkčná vzdialenosť medzi podpornými ložiskami
E	[GPa]	– modul pružnosti v ťahu
I	[mm ⁴]	– kvadratický moment prierezu v ohybe
d	[mm]	– priemer hriadeľa



Obr. 5-5 Rozmiestnenie súčastí na hriadeľi

Tab. 4 Mechanické vlastnosti ocele 16MnCr5 [22]

Mechanické vlastnosti ocele 16MnCr5 pre priemer 25 mm	
Medza klzu R_e [MPa]	540
Minimálna medza pevnosti $R_{m \min}$ [MPa]	785

Výpočet ohybového momentu:

$$M_O = \frac{F}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{10 \text{ kN}}{2} \cdot \frac{72 \text{ mm}}{2} = 180000 \text{ Nmm} \quad (5.4)$$

kde:

M_O	[Nmm]	je maximálny ohybový moment
-------	-------	-----------------------------

Výpočet ohybového napätia:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{180000 \text{ Nmm}}{\frac{\pi \cdot (25 \text{ mm})^3}{32}} = 117,34 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

kde:

σ_o [MPa] je ohybové napätie
 W_o [mm³] – modul prierezu v ohybe

Bezpečnosť k medznému stavu pružnosti:

$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_o} = \frac{540 \text{ MPa}}{117,34 \text{ MPa}} = 4,60 \quad (5.6)$$

kde:

k_k [1] je bezpečnosť k medznému stavu pružnosti
 R_e [MPa] – medza klzu

Určenie medze únavy [21]:

$$\sigma_{Co} = 0,504 \cdot R_{m \min} = 0,504 \cdot 785 \text{ MPa} = 395,64 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

kde:

σ_{Co} [MPa] je medza únavy materiálu
 $R_{m \min}$ [MPa] – minimálna medza pevnosti v ťahu

Určenie korigovanej medza únavy [21]:

$$\sigma'_{Co} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot \sigma_{Co} \quad (5.8)$$

$$\sigma'_{Co} = 0,897 \cdot 0,881 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,753 \cdot 1 \cdot 395,64 \text{ MPa} = 235,43 \text{ MPa}$$

kde:

σ'_{Co} [MPa] je korigovaná medza únavy v kritickom mieste súčiastky
 k_a [1] – súčiniteľ vplyvu akosti povrchu
 k_b [1] – súčiniteľ vplyvu veľkosti telesa
 k_c [1] – súčiniteľ vplyvu spôsobu zaťažovania
 k_d [1] – súčiniteľ vplyvu teploty
 k_e [1] – súčiniteľ spoľahlivosti
 k_f [1] – súčiniteľ zahrňujúci ďalšie vplyvy

Vzťah, ktorým je počítaná bezpečnosť, vid' rovnica (5.9), je zvolený pre kombináciu Goodmanového kritéria v spojení s teóriou HMM. Vzťah bol použitý taktiež z dôvodu, že spĺňal nasledujúce kritériá [21]:

- Amplitúda ohybového momentu je rovná maximálnemu ohybovému momentu.

- Stredná hodnota ohybového momentu je rovná nule.
- Krútiaci moment je konštantný.

$$k_u = \left(\frac{16}{\pi \cdot d^3} \cdot \left(2 \cdot \frac{\beta \cdot M_o}{\sigma'_{co}} + \sqrt{3} \cdot \frac{\beta_\tau \cdot M_{Km}}{R_{m \min}} \right) \right)^{-1} \quad (5.9)$$

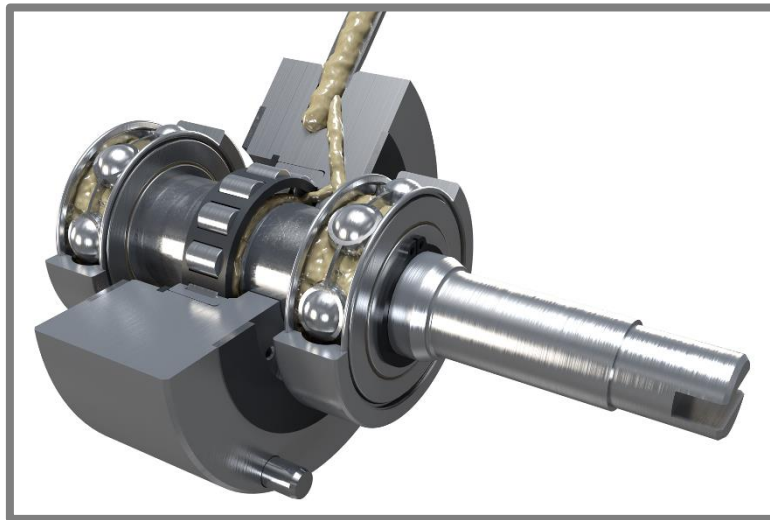
kde:

k_u	[1]	je bezpečnosť k medznému stavu únavy
β	[1]	– súčiniteľ vrubu pre ohyb
β_τ	[1]	– súčiniteľ vrubu pre krut
M_{Km}	[Nmm]	– nepremenný krútiaci moment

Keďže v tomto prípade bol krut zanedbaný, je možné tento vzorec zjednodušiť, vid' nasledujúca rovnica:

$$k_u = \left(\frac{16}{\pi \cdot d^3} \cdot \left(2 \cdot \frac{\beta \cdot M_o}{\sigma'_{co}} \right) \right)^{-1} \quad (5.10)$$

$$k_u = \left(\frac{16}{\pi \cdot (25 \text{ mm})^3} \cdot \left(2 \cdot \frac{1 \cdot 180000 \text{ Nmm}}{235,43 \text{ MPa}} \right) \right)^{-1} = 2,00$$

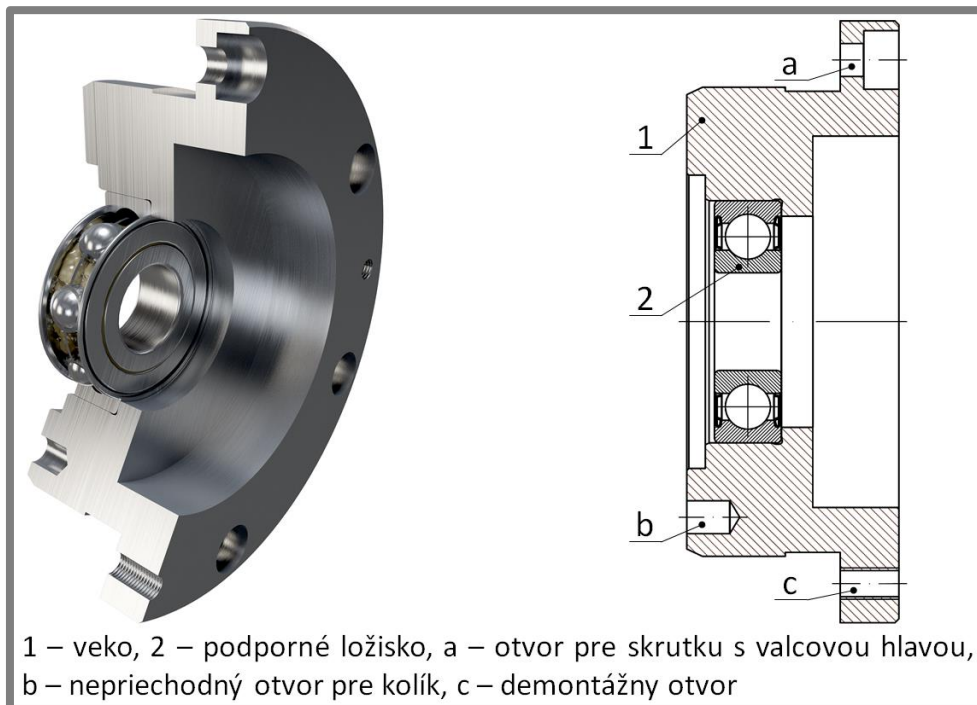


Obr. 5-6 Privedenie maziva do testovaného ložiska

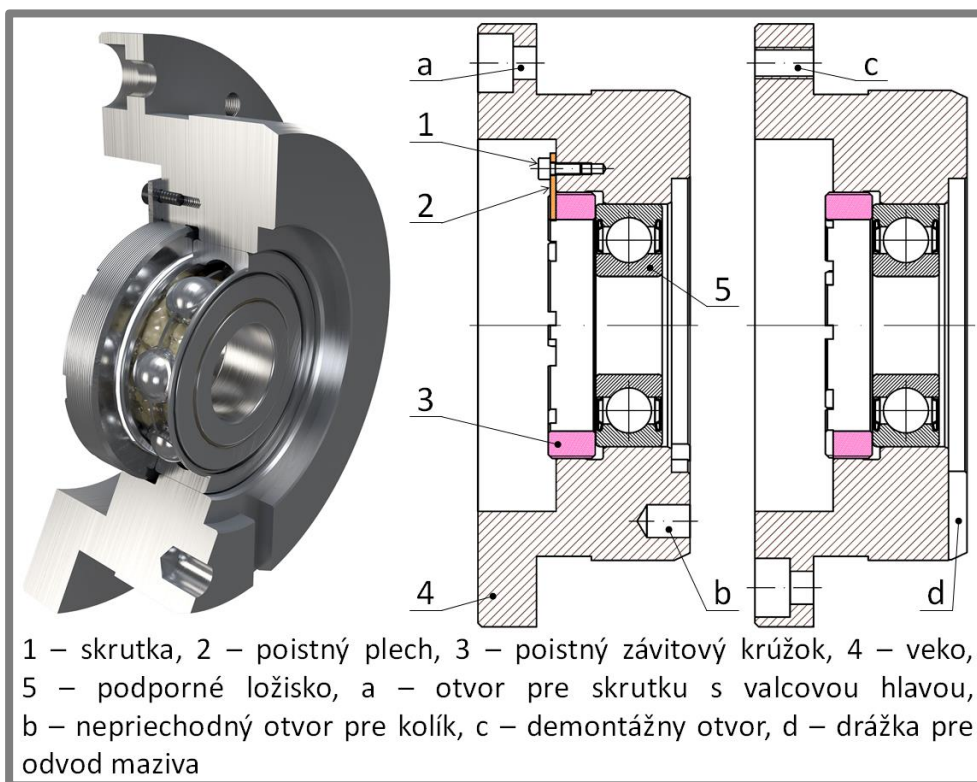
5.1.5 Návrh umiestnenia podporných ložísk

Podporné ložiská sú umiestnené vo vekách, vid' obr. 5-7 a 5-8. Jedná sa o dva rôzne veka. Veko zobrazené na obr. 5-7 neumožňuje pre podporné ložisko žiaden axiálny posuv, avšak u veka zobrazeného na obr. 5-8 je možnosť nastavenia axiálnej vôle pomocou poistného závitového krúžku. Tento závitový krúžok je proti samovoľnému pootočeniu poistený pomocou plechu a skrutky. Na tomto veku sa taktiež nachádza aj

drážka, ktorá slúži pre odvod plastického maziva k odtokovému otvoru. Nepriechodné diery v spodnej časti vek sú určené pre voľne uložený kolík, ktorý ako už bolo uvedené vyššie, slúži k zaisteniu polohy objímky testovaného ložiska. Demontáž vek zo stanice je zaistená pomocou odtlačacích závitových otvorov.



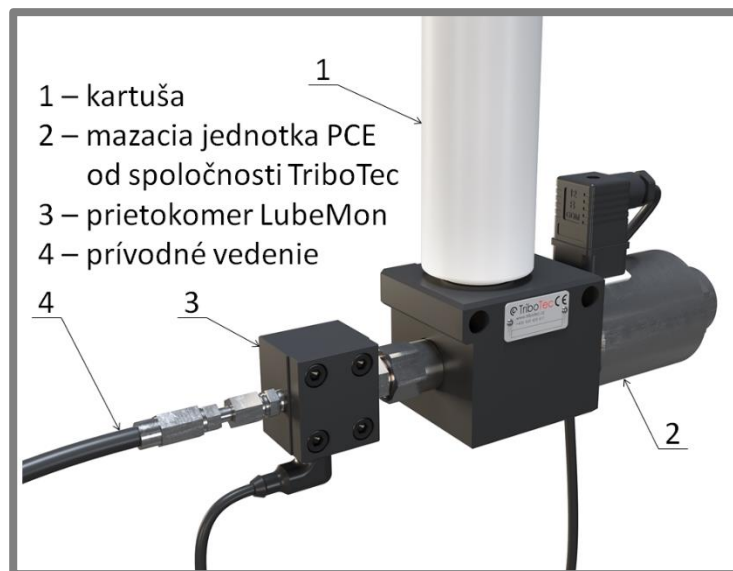
Obr. 5-7 Umiestnenie axiálne vodiaceho ložiska



Obr. 5-8 Umiestnenie axiálne voľného podporného ložiska

5.1.6 Mazacia jednotka

Mazanie je prevedené pomocou mazacieho prístroja PCE od spoločnosti TriboTec, vid' obr. 5-9. Jedná sa o jednoduché piestové čerpadlo, ktoré dávkuje plastické mazivo z kartuše pomocou elektromagnetu. Dávkované mazivo následne prechádza prírodným vedením až do objímky testovaného ložiska.

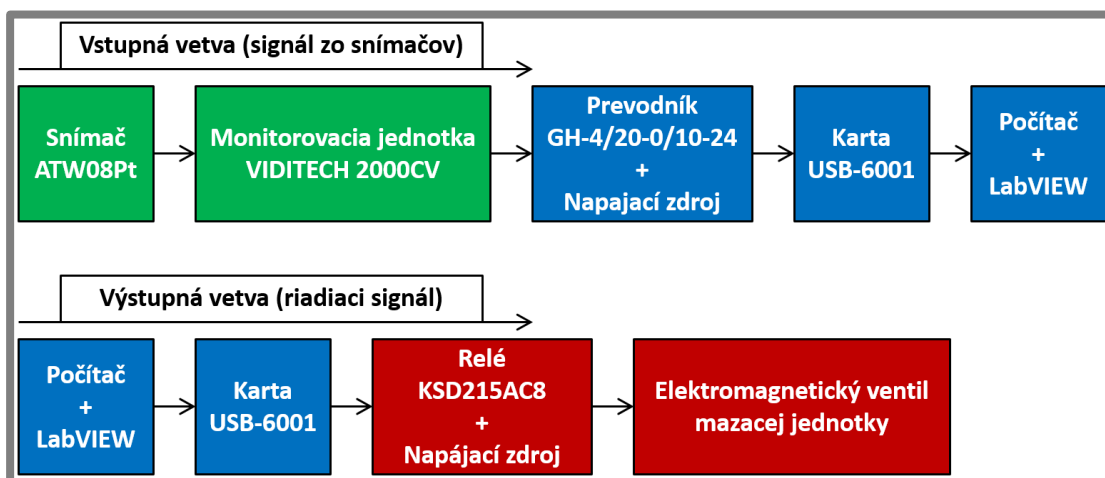


Obr. 5-9 Mazacia jednotka

5.2 Elektronika a riadiaci program

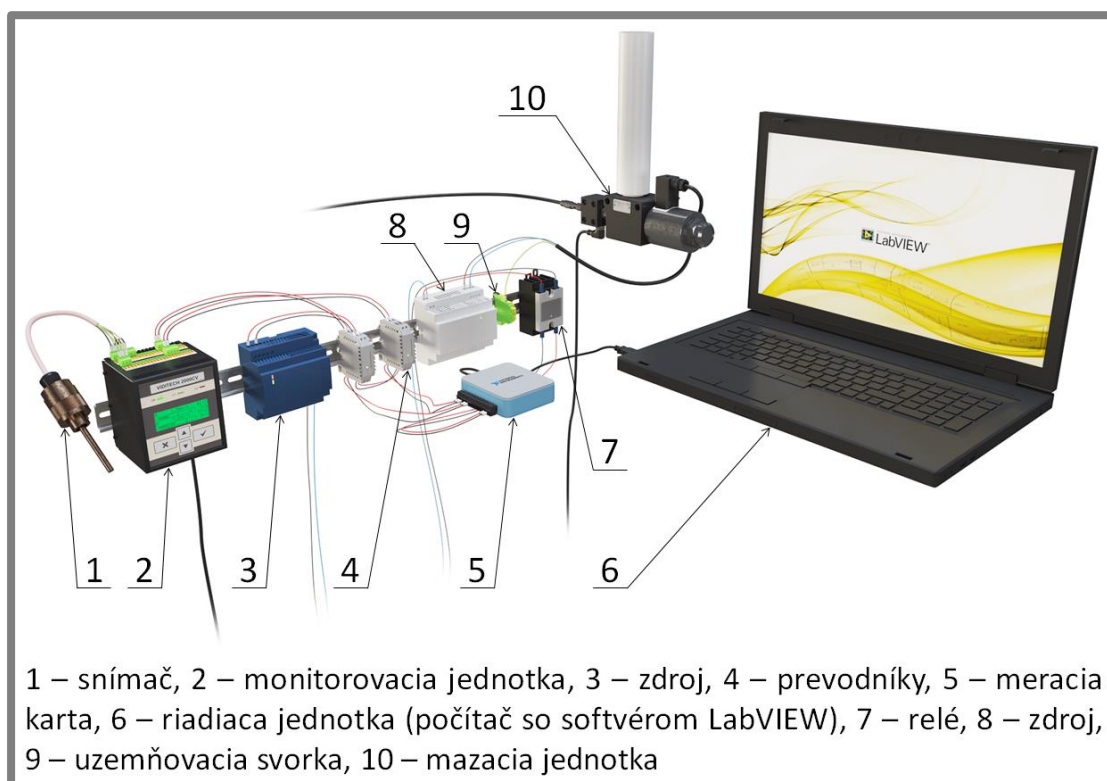
5.2.1 Elektronika

Návrh pripojenia platformy pre riadenie mazania je zobrazený na obr. 5-10. Pozostáva zo vstupnej vetvy, ktorá rieši privedenie signálu snímača do riadiacej jednotky a výstupnej vetvy, ktorá rieši riadenie elektromagnetického ventilu mazacej jednotky.



Obr. 5-10 Schematický návrh pripojenia platformy pre riadenie mazania

Ako už bolo spomenuté v koncepčnom riešení, signál spracováva monitorovacia jednotka, ktorá obsahuje prúdové výstupy (4 – 20 mA). Signál je teda z týchto prúdových výstupov privádzaný do prevodníkov, ktoré menia prúdový signál (4 – 20 mA) na napätový (0 – 10 V). Následne je signál privedený do meracej karty, ktorá je pripojená k riadiacej jednotke (počítač so softvérom LabVIEW). Táto riadiaca jednotka signál spracováva, vyhodnocuje a následne pomocou meracej karty zopína relé, ktoré riadi elektromagnetický ventil dávkovacej jednotky.



Obr. 5-11 Platforma pre riadenie mazania podľa diagnostických veličín

5.2.2 Riadiaci program

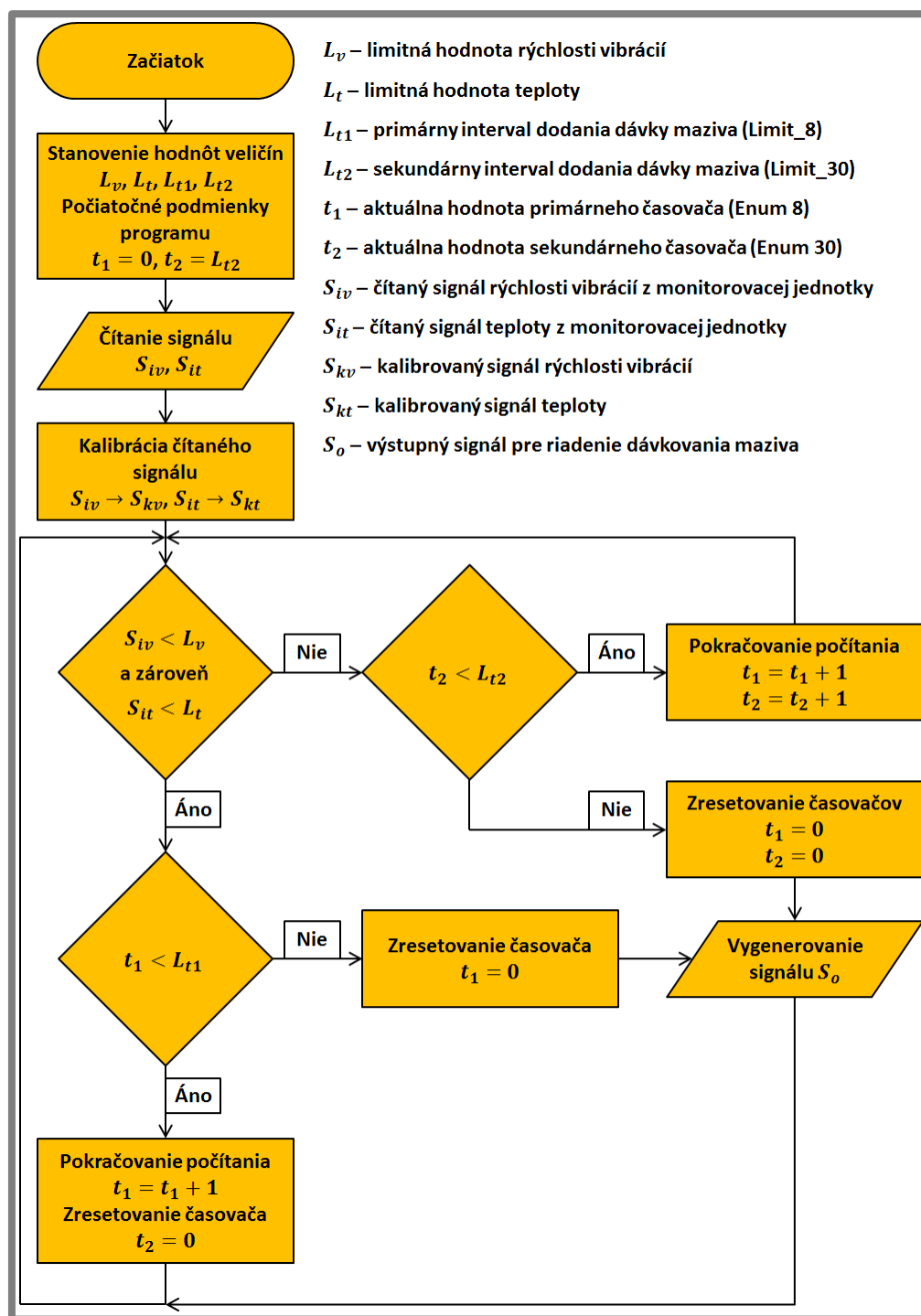
5.2.2

Riadiaci program bol vytvorený v softvéri LabVIEW a je zobrazený na obr. 5-13. Pozostáva z piatich základných častí, ktoré sú:

- privedenie vstupného signálu zo snímača
- kalibrácia signálu
- podmienka vyhodnocujúca stav ložiska
- časovače počítajúce intervaly dávkovania
- generovanie výstupného signálu pre riadenie dávkovania

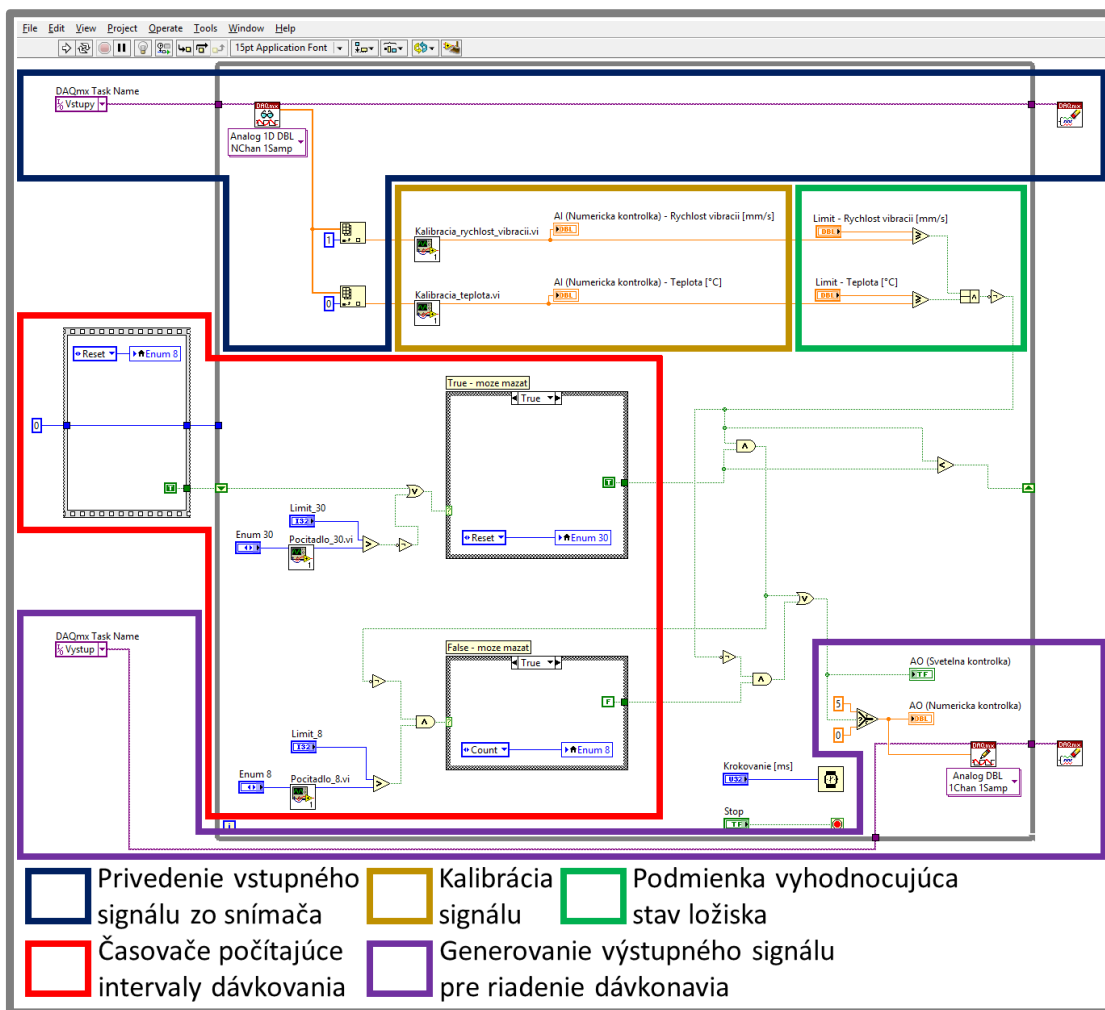
Princíp tohto programu je znázornený vývojovým diagramom na obr. 5-12. Riadenie spočíva v porovnávaní kalibrovaného signálu rýchlosti vibrácií a teploty zo snímača

s vopred určenými limitnými hodnotami týchto veličín. V prípade, že k prekročeniu týchto limitných hodnôt nedochádza, dávkovanie maziva je riadené na základe primárneho časového intervalu, ktorý je v programe označený názvom **Limit_8**. Tento interval je vopred nastavený na určitú časovú hodnotu (napr. 8 hod) a po jej dosiahnutí je následne vygenerovaný výstupný signál pre riadenie elektromagnetického ventilu dávkovacej jednotky (dodanie jednej dávky maziva). Časovač (**Enum 8**) sa následne vyresetuje a počíta stanovený interval nanovo.



Obr. 5-12 Princíp riadiaceho programu

V momente, kedy dôjde k prekročeniu aspoň jednej limitnej hodnoty, je ihneď vygenerovaný výstupný signál, ktorý do ložiska dodá jednu dávku maziva. Dávkovanie maziva je následne riadené pomocou sekundárneho časového intervalu, ktorý je v programe označený názvom **Limit_30**. Jedná sa o interval, ktorý je tiež vopred nastavený, avšak časová hodnota je výrazne nižšia (napr. 30 min). Po dosiahnutí tejto časovej hodnoty taktiež dochádza k vygenerovaniu výstupného signálu pre riadenie elektromagnetického ventilu dávkovacej jednotky (dodanie jednej dávky maziva). Tento časovač (**Enum 30**) sa vyresetuje a počíta stanovený interval nanovo, až kým nedôjde k poklesu snímaných hodnôt pod limitné hodnoty.



Obr. 5-13 Riadiaci program

5.3 Realizácia

5.3

5.3.1 Zostavenie testovacia stanica

5.3.1

Pre zostavenie testovacej stanice bolo potrebné v prvom rade previesť lepené spoje medzi objímkou a klznými krúžkami a taktiež medzi objímkou a vonkajším krúžkom testovaného ložiska. Vonkajší krúžok testovaného ložiska bol následne ešte poistený pomocou poistného krúžku. Po vytvrdení lepených spojov nasledovalo lisovanie ložísk na hriadeľ (zostavené podľa obr. 5-5). V priebehu tohto lisovania bol ako prvý

nalisovaný vnútorný krúžok testovaného ložiska a jedno z podporných ložísk, ktoré bolo odsadené od testovaného ložiska pomocou dištančného krúžku. Následne bola na hriadeľ nasadená objímka (s prilepenými klznými krúžkami a zvyšnou časťou testovaného ložiska) a potom sa nalisovalo druhé podporné ložisko, ktoré bolo taktiež odsadené od testovaného ložiska pomocou dištančného krúžku. Na záver sa ložiská proti axiálnemu posunutiu poistili z oboch strán pomocou poistných krúžkov.

Po nalisovaní ložísk nasledovalo vyplnenie voľného priestoru vedľa testovaného ložiska a priestoru v samotnom ložisku (viď obr. 5-6). Priestor bol vyplnený pomocou mazacej jednotky, ktorá dávkovala mazivo cez dočasne pripojené prírodné vedenie. Z dôvodu, aby dochádzalo k rovnomernému rozloženiu maziva, bol hriadeľ po jednotlivých dodaných dávkach otáčaný.

Na hriadeľ bol následne nasadený diel spojky (náboj s poistným plechom), ktorý prenáša otáčky elektromotora. Zlisovaná zostava bola v tomto stave vložená do telesa stanice, kde nasledovala montáž prvého podporného ložiska do zadného veka. Poloha tohto veka vzhľadom k telesu stanice bola pred zaskrutkovaním doladená pomocou tenkých papierových dištančných krúžkov, ktoré mali v súčte šírku 0,2 mm. Po namontovaní ložiska bola zaistená poloha objímky prostredníctvom voľne uloženého kolíka v spodnej časti. Uzavretie telesa stanice bolo prevedené montážou predného veka, do ktorého bol zaskrutkovaný závitový krúžok poistený pomocou plechu a skrutky. Taktiež aj toto veko bolo odsadené od telesa stanice pomocou papierových dištančných krúžkov o šírke 0,2 mm. V záverečnej časti montáže bol zostavený záťažný mechanizmus a taktiež boli pripojené zvyšné potrebné prvky (prívod maziva a snímač). Zostavenú testovaciu stanicu môžete vidieť na obr. 5-14.



Obr. 5-14 Zostavená testovacia stanica

5.3.2 Zostavenie riadiacej elektroniky

Riadiaca elektronika sa nachádza v rozvodnej skrini, viď obr. 5-15. Realizácia zahrňovala využitie niektorých súčastí, ktoré táto skriňa obsahovala (monitorovacia jednotka, zdroj, uzemňovacia svorka, notebook) a taktiež implementovanie nových potrebných súčastí (prevodníky, zdroj, relé, meracia karta, privedenie kábla z mazacej jednotky).

Po prepojení elektroniky bolo taktiež potrebné zaistiť softvérovú podporu (nainštalovanie softvéru LabVIEW s príslušnými ovládačmi pre meraciu kartu USB-6001). Po zapojení hardvéru a nainštalovaní softvéru bolo následne riadenie odskúšané pomocou vytvoreného programu.

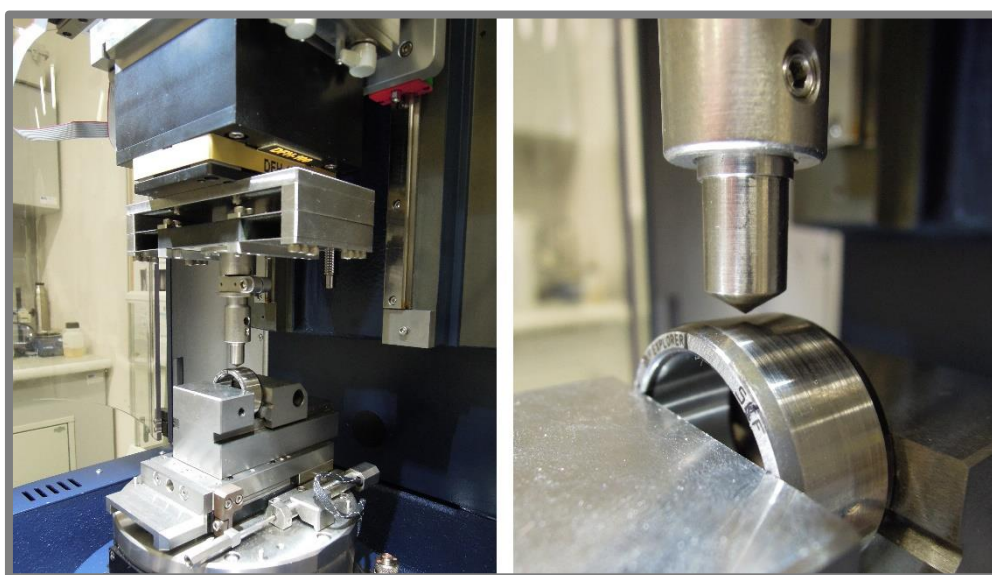


Obr. 5-15 Implementácia riadiacej elektroniky

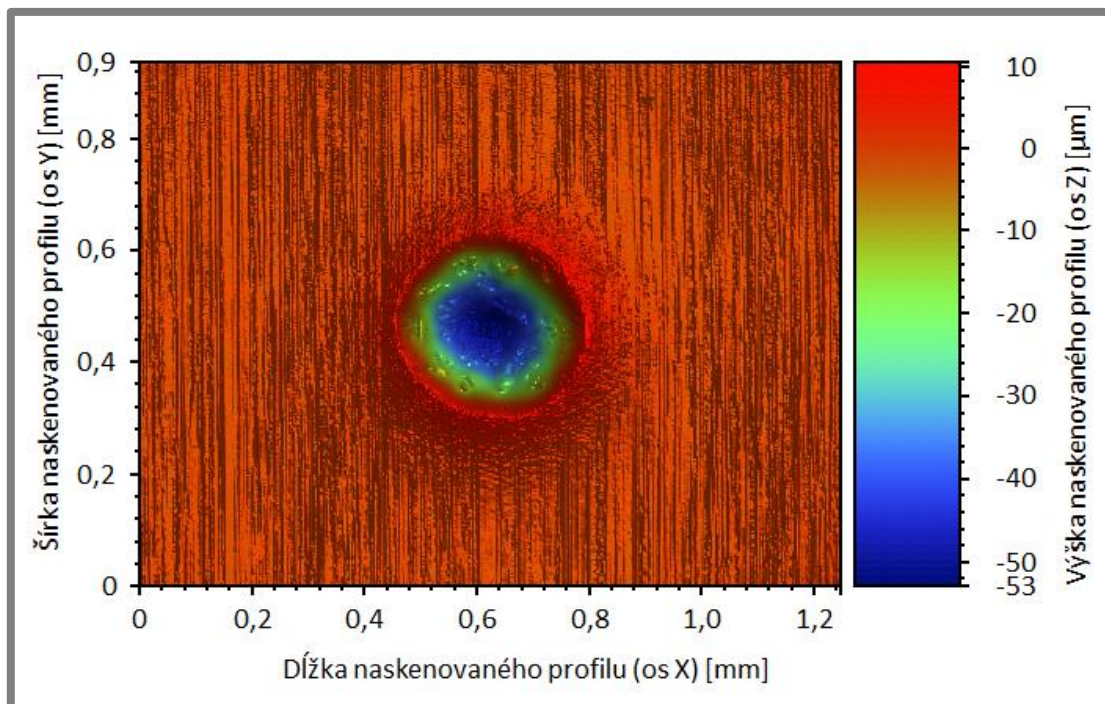
5.3.3 Vytváranie preliačín

5.3.3

Vytváranie preliačín bolo prevádzané za účelom urýchlenia trvanlivostných testov. Preliačiny boli vytvorené pomocou Rockwellového indenteru, ktorý bol vtlačaný do obežnej dráhy vnútorného krúžku testovaného ložiska (viď obr. 5-16). Po obvode tohto krúžku bolo týmto spôsobom vytvorených osem rovnomerne rozložených preliačín o rovnakom priemere. Pre jednotlivé testy boli skúšané priemery o veľkosti 200, 270 a 300 μm (viď ukážku na obr. 5-17). Detailnejšie informácie o priemere, hĺbke a prevýšení hrany všetkých skúšaných preliačín sú uvedené v prílohe 2.



Obr. 5-16 Vytváranie preliačín pomocou Rockwellového indenteru



Obr. 5-17 Ukážka vytvorenej preliachiny o priemere 300 µm

5.3.4 Realizácia overovacích experimentov

Podľa zadania boli realizované tri druhy overovacích experimentov. Jednalo sa o trvanlivostné testy s bežným intervalovým mazaním (prevedený bol jeden test), s iniciovaným poškodením (prevedené boli tri testy) a s proaktívne riadeným mazaním (prevedený bol jeden test). Dávkovanie v teste s bežným intervalovým mazaním a v testoch s iniciovaným poškodením bolo riadené na základe digitálneho elektronického časovača TT 34 [23]. V teste s proaktívne riadeným mazaním bolo dávkovanie maziva riadené na základe zostavenej riadiacej elektroniky a vytvoreného programu v softvéri LabWIEW.

Domazávací interval bol vypočítaný podľa rovnice (5.11), ktorú uvádza FAG [24]. Odkúšané však boli taktiež aj domazávacie intervaly o iných hodnotách.

$$t_{fq} = t_f \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \quad (5.11)$$

$$t_{fq} = 4300 \text{ hod} \cdot 0,25 \cdot 0,25 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 1 = 8,06 \text{ hod} \rightarrow 8 \text{ hod}$$

kde:

t_{fq}	[hod]	je redukovaný interval mazania
t_f	[hod]	– interval mazania
f_1	[1]	– redukčný súčiniteľ vplyvu prachu a vlhkosti na kontaktné plochy ložiska
f_2	[1]	– redukčný súčiniteľ vplyvu nárazového zaťaženia a vibrácií
f_3	[1]	– redukčný súčiniteľ vplyvu vysokej teploty ložiska
f_4	[1]	– redukčný súčiniteľ vplyvu vysokých zaťažení

f_5	[1]	– redukčný súčiniteľ vplyvu prúdu vzduchu prechádzajúceho ložiskom
f_6	[1]	– redukčný súčiniteľ vplyvu odstredivého efektu alebo vertikálneho hriadeľa v závislosti od tesnenia

Pozn. Hodnoty redukčných súčiniteľov f_5 a f_6 boli uvažované ako 1, pretože ložisko sa nachádza v telese stanice (ložiskovom domčeku) a nemá tesnenia.

Všetky testy boli zaznamenávané v softvéri VDT Control Center [25] od spoločnosti Viditech s minútovou periódou. Zaznamenávané boli hodnoty troch veličín (rýchlosť vibrácií, teplota a kondícia ložiska). Výsledky týchto testov sú rozobrané v kapitole Diskusia a celkové záznamy z testov sú uvedené v prílohe 4.

6 DISKUSIA

Diskusia pozostáva zo štyroch hlavných častí. Prvou časťou je zhodnotenie funkčného prototypu testovacej stanice pre domazávanie plastickým mazivom. Druhá časť je zameraná na platformu pre riadenie mazania, ktorá zahŕňa elektroniku a riadiaci program. Tretou časťou sú prevedené overovacie experimenty a poslednou časťou je celkové zhodnotenie funkčnosti systému.

6.1 Diskusia funkčného prototypu testovacej stanice

Po navrhnutí konštrukčných úprav pre variant A (viď obr. 4-2 a 4-3) bol tento návrh kriticky zhodnotený. Na základe tohto kritického zhodnotenia bol variant A prepracovaný do optimálnej podoby, ktorou bol variantu B (viď obr. 4-4 a 4-5). Tento variant bol podrobne popísaný v predchádzajúcej kapitole (viď podkapitola 5.1). Následne bola vytvorená výkresová dokumentácia (viď príloha 5), na základe ktorej boli diely vyrobené. Ďalšie potrebné komponenty boli buď dodané spoločnosťou TriboTec (mazacia jednotka, kartuše, prírodné vedenie zahrňujúce hadicu, redukcie, prírodnú trúbku apod.), alebo boli dokúpené (napr. klzné krúžky, ložiská, lepidlá).

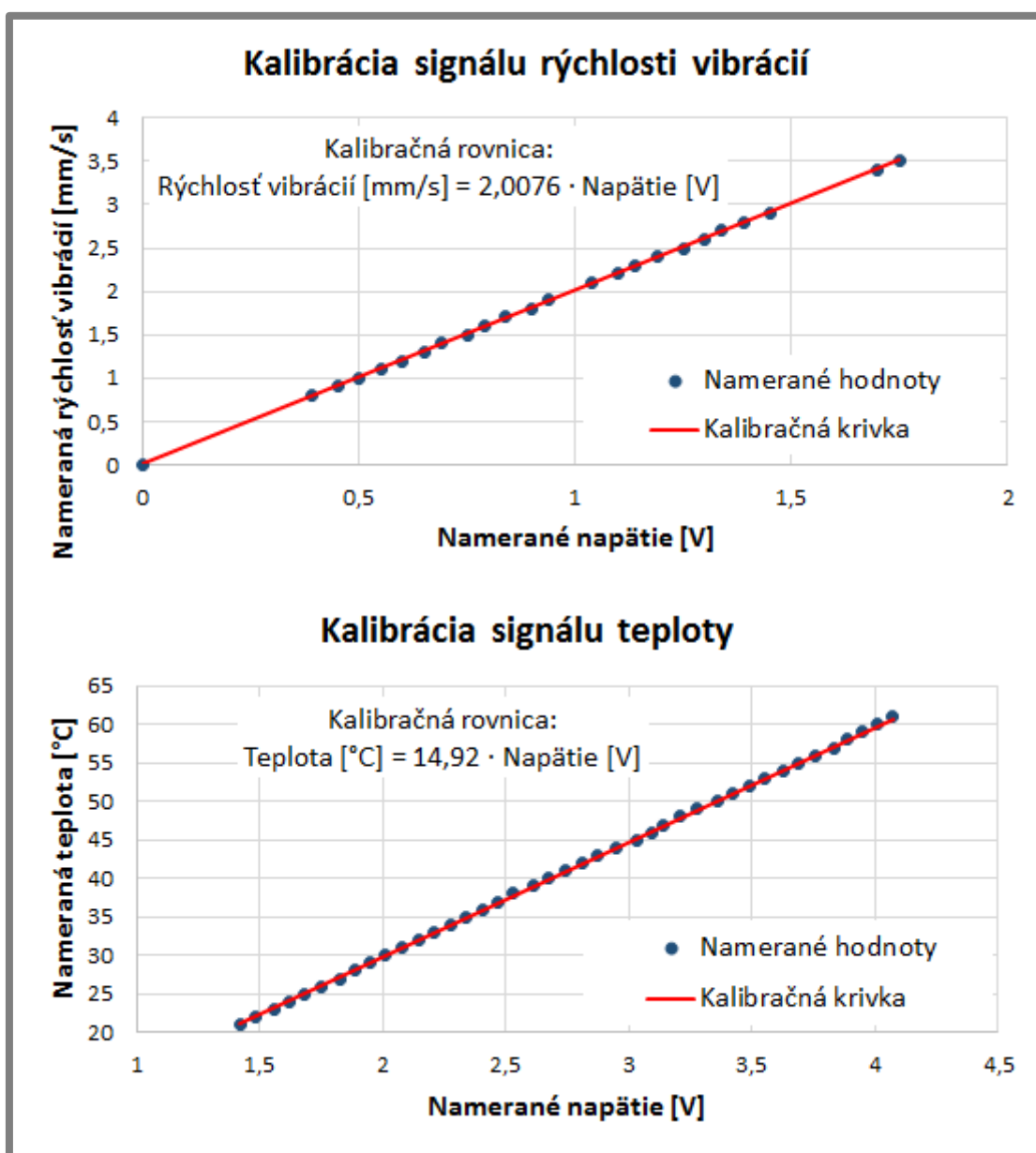
Po zostavení prototypu testovacej stanice prebehlo jej odskúšanie prostredníctvom prvého testu trvanlivosti (tento test je podrobnejšie popísaný v podkapitole 6.3.1). Pri tomto teste boli odladené dva problémy. Prvým nájdeným problémom bolo vymedzenie vôle medzi objímkou a vekami. Tento problém bol následne vyriešený pomocou vloženia širších papierových dištančných krúžkov medzi veko a teleso stanice, čím sa veko od objímky odsadilo. Druhým nájdeným problémom bola strata zaťaženia, ktorá bola spôsobená trením predlžovacieho čapu záťažného mechanizmu o teleso stanice. Tento problém však nebol zapríčinený úpravou tejto stanice pre domazávanie plastickým mazivom. Problém bol odstránený doladením polohy strmeňa záťažného mechanizmu.

V prvom teste s iniciovaným poškodením (viď podkapitola 6.3.2) bol následne vyzorovaný ďalší problém. Jednalo sa nadmerné vibrovanie spodného záťažného ramena, ktoré spôsobovalo stratu zaťaženia. Tento problém nastal po navýšení zaťaženia na 9900 N, ktoré si vyžadovalo preskupenie závaží na záťažných ramenách. Problém bol zistený na základe priebehu a dĺžky prevádzkovaného testu, ktorý presiahol vyše 890 hodín. Riešením tohto problému bolo nájdenie kombinácie závaží na ramenách tak, aby došlo k dostatočnému zaťaženiu spodnej páky pri čo najmenšej zmene zaťaženia. Týmto spôsobom bola nájdená kombinácia, ktorá vytvára zaťaženie o veľkosti 9700 N.

6.2 Diskusia platformy pre riadenie mazania

Na základe zvoleného programovacieho prostredia (LabVIEW), bola navrhnutá platforma pre riadenie mazania pomocou diagnostických veličín (viď obr. 5-11). Pre túto platformu boli využité monitorovacie prvky, ktoré boli k dispozícii (napr. snímač, monitorovacia jednotka s príslušným programom). Väčšina potrebných prvkov musela byť však dokúpená (napr. prevodníky, zdroj, relé). Po zostavení tejto platformy a

vytvorení riadiaceho programu nasledovalo overenie funkčnosti vstupov a výstupov. Ukázalo sa, že celá platforma funguje v poriadku, avšak nastával tu problém s kalibrováním vstupného signálu. Problém sa týkal hlavne kalibrácie rýchlosti vibrácií, pretože táto veličina nie je snímaná pomocou používaného snímača s označením ATW08Pt (akcelerometer s integrovaným teplotným čidlom). Jedná sa teda o veličinu, ktorá je spracovaná na základe zrýchlenia vibrácií až v monitorovacej jednotke. Kalibrácia bola prevedená až pri overovanom experimente za pomoci softvéru pre monitorovanie (VDT Control Center). Tento softvér zaznamenával hodnoty rýchlostí vibrácií a teploty, ku ktorým boli priradené hodnoty odpovedajúcich napätí z riadiacej jednotky. Následne z týchto dát boli zostavené kalibračné krivky (viď grafy znázornené na obr. 6-1).



Obr. 6-1 Kalibračné krivky a predpisy

Táto prevedená kalibrácia však nemusí byť úplne najpresnejšia, a to najmä u signálu rýchlostí vibrácií. Signál tejto veličiny sa často mení a softvér, ktorý je určený pre monitorovanie stavu ložísk (VDT Control center) nezaznamenáva úplne každú zmenu hodnoty z monitorovacej jednotky (Viditech 2000CV). Monitorovací program navyše taktiež funguje s malým oneskorením. Z hľadiska použiteľnosti je však táto platforma a riadiaci program funkčný aj s kalibráciou, ktorá bola spomínaná vyššie, pretože odchýlky nie sú veľké (overené pri teste).

Z hľadiska ďalšieho vývoja by bolo dobré vytvoriť v spomínanom riadiacom programe záznamník. Tento záznamník by zaznamenával všetky merané veličiny a taktiež aj presné časy dodania dávky maziva do ložiska. Z týchto dát by bolo následne lepšie možné určiť, aký dopad má proaktívne riadené mazanie na životnosť ložiska. Riadiaci program by mal byť taktiež ďalej rozvinutý, a to najmä z hľadiska vyhodnocujúcej podmienky pre riadenie dávkovania.

Ďalší vývoj by mohol taktiež priniesť aj prípadné odskúšanie iných monitorovacích jednotiek s príslušnými snímačmi, ktorá by nahradila súčasnú monitorovaciu jednotku.

6.3 Diskusia prevedených overovacích testov

Ako už bolo spomenuté, overovacie testy prebiehali na ložiskách, ktoré mali označenie NU 205 ECP. Tieto ložiská boli nakúpené od spoločnosti SKF. Tento výrobca narozdiel od iných výrobcov ložísk NU 205 ECP uvádza vyššiu dynamickú únosnosť, čo sa prejaví na vyššej trvanlivosti, avšak u tohto výrobcu je taktiež väčšia pravdepodobnosť opakovateľnosti výsledkov experimentov.

Experimenty je možné rozdeliť do troch kategórií. Jedná sa o experimenty s bežným intervalovým mazaním, s iniciovaným poškodením a s proaktívne riadeným mazaním. Tieto experimenty sú uvedené nasledujúcich podkapitolách.

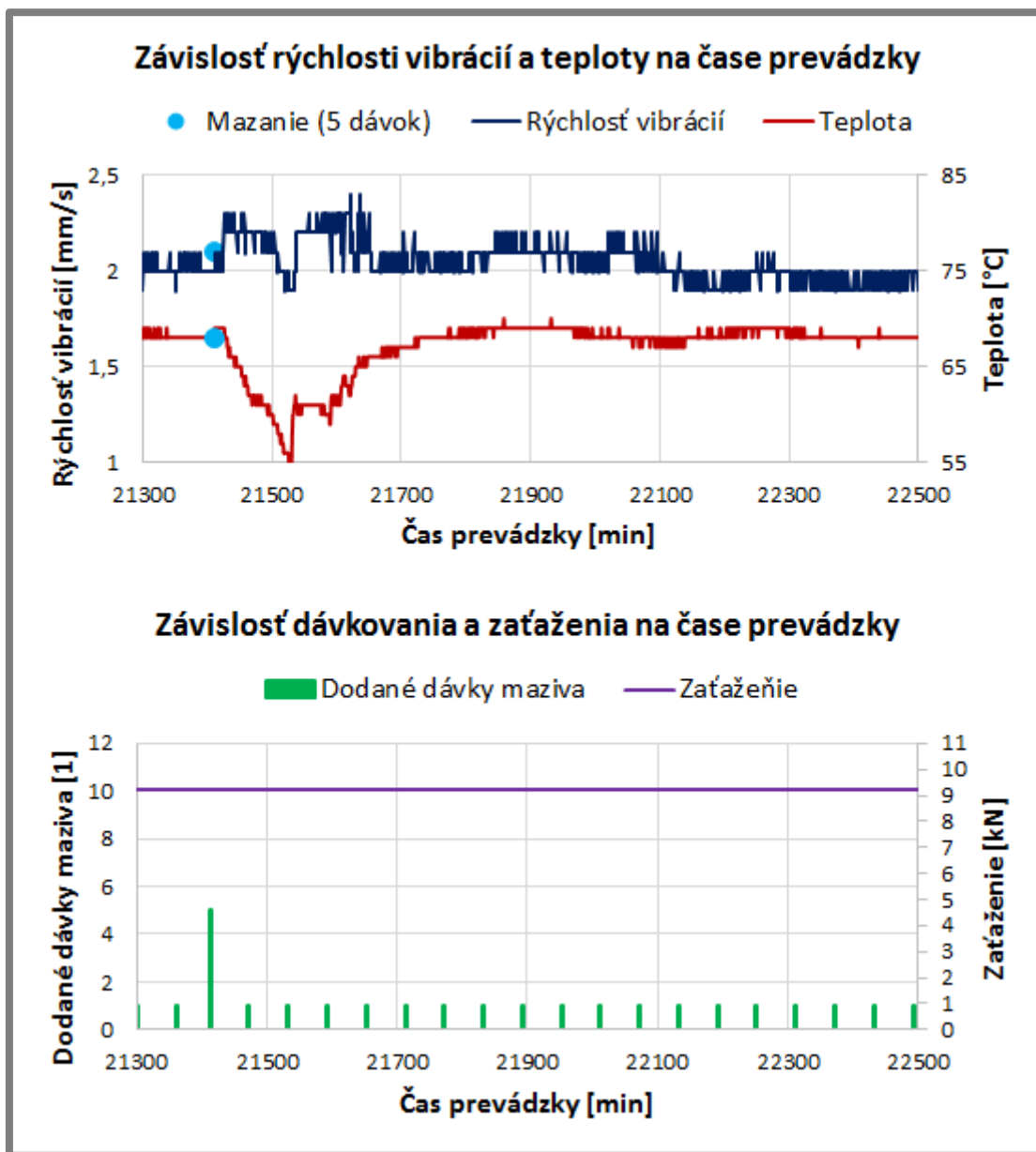
6.3.1 Test s bežným intervalovým mazaním

Test z veľkej časti slúžil pre overenie prototypu testovacej stanice. Z tohto dôvodu boli počas testu odskúšané rôzne domazávacie intervaly a zaťaženia. V teste bolo taktiež skúšané sledovať vplyv väčšieho množstva dodaného maziva (5 dávok a 10 dávok) na priebeh rýchlostí vibrácií a teploty (viď obr. 6-2 a 6-3).

Pri dodaní piatich dávok maziva zobrazených na obr. 6-2 (počas nastaveného domazávacieho intervalu o veľkosti 60 min) bol pozorovaný veľký pokles teploty, ktorá sa približne po siedmych hodinách vrátila na rovnakú hodnotu. Vibrácie v čase dodania maziva dosahovali hodnotu 2 až 2,1 mm/s. Od dodania maziva boli následne vibrácie mierne zvýšené, avšak približne po pätnástich hodinách došlo k ich ustáleniu na hodnote, ktorá bola o niečo nižšia ako počiatočná (1,9 až 2 mm/s).

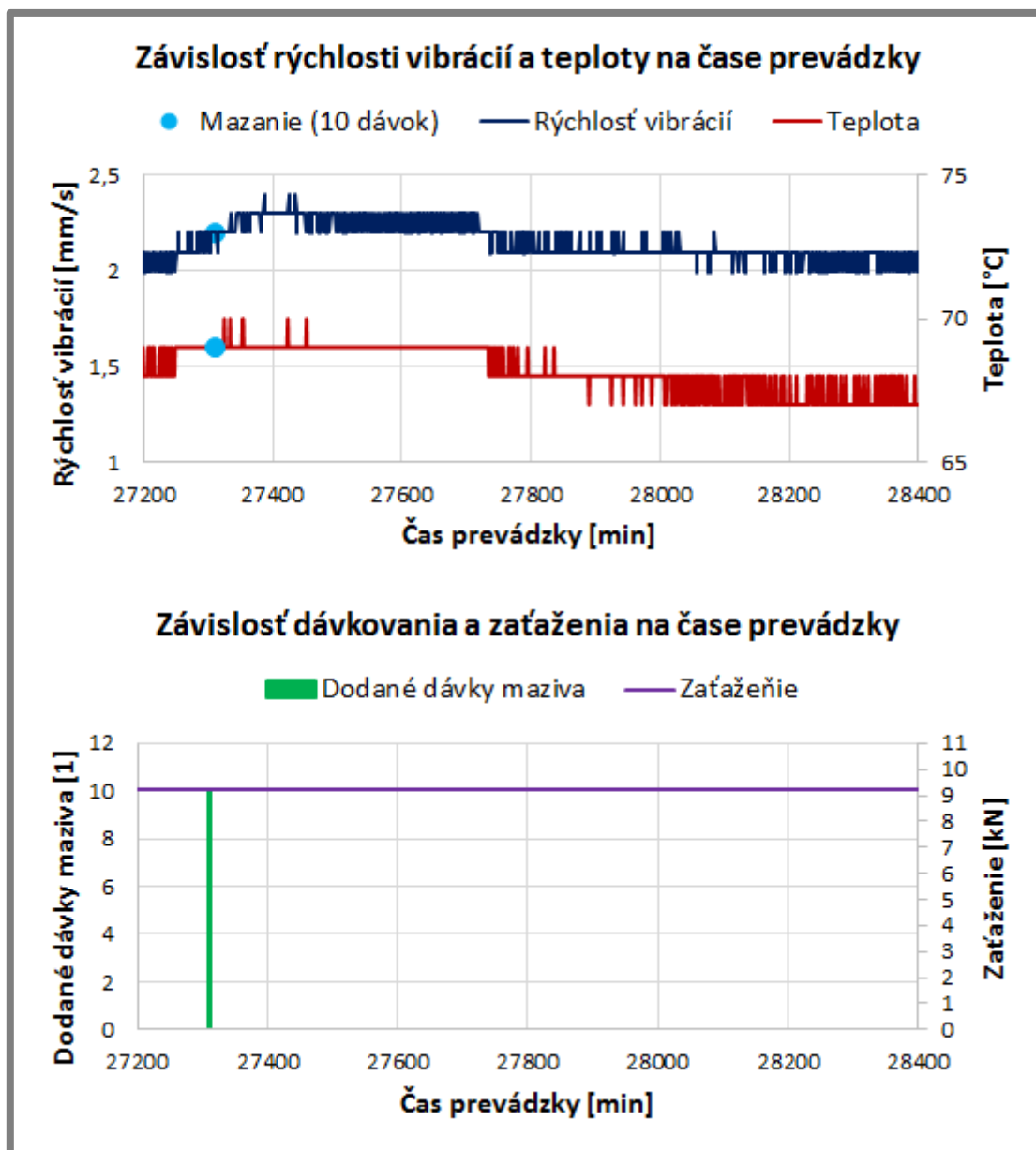
Dodanie desiatich dávok maziva zobrazených na obr. 6-3 (pri vypnutom intervalovom dávkovaní) nevyvolalo u teploty rovnaký efekt ako pri dodaní piatich dávok. Teplota mala tendenciu skôr rásť, avšak približne po deviatich hodinách bol pozorovaný mierny pokles. Vibrácie v čase dodania maziva dosahovali hodnotu 2,1 až 2,2 mm/s.

Dodanie desiatich dávok spôsobilo ich mierny nárast, avšak približne po trinástich hodinách došlo k ich ustáleniu na hodnote 2 až 2,1 mm/s. Po ustálení teda aj v tomto prípade došlo k miernemu poklesu vibrácií.



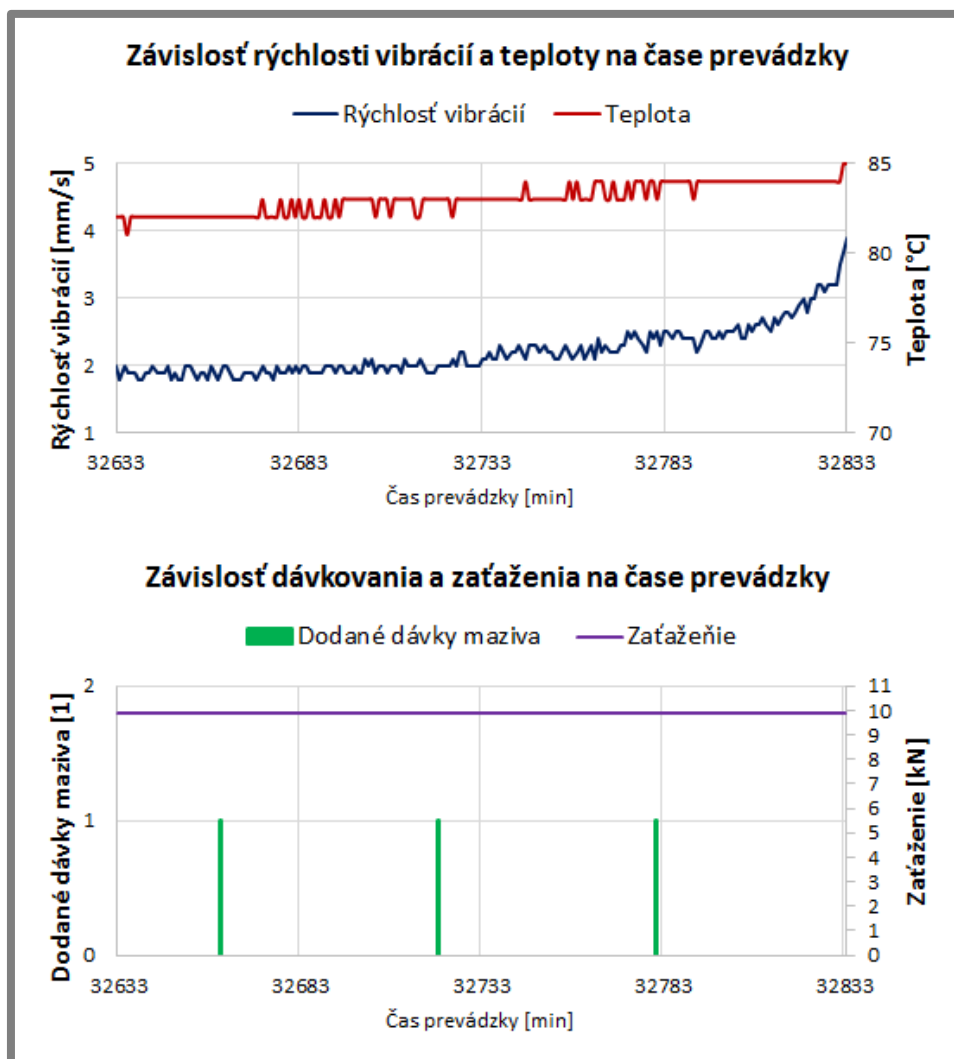
Obr. 6-2 Priebeh po dodaní piatich dávok maziva

Z tohto jedného prevedeného testu však nie je možné vyvodiť konkrétne tvrdenie o vplyve množstva dávky na priebeh testu. Pre overenie uvedených stavov by bolo potrebné previesť viac rovnakých experimentov, v ktorých by boli tieto dávky aplikované znovu a následne by bol odsledovaný ich vplyv.



Obr. 6-3 Priebeh po dodaní desiatich dávok maziva

Graf na obr. 6-4 znázorňuje posledných 200 minút prevádzky testu. V tejto oblasti došlo k prudkému nárastu vibrácií a miernemu nárastu teploty. Test bol zastavený z dôvodu prekročenia limitnej hodnoty vibrácií (3,8 mm/s). Po rozmontovaní testovacej stanice bolo na obežnej dráhe vnútorného krúžku testovaného ložiska nájdené únavové porušenie (pitting), vid' obr. 6-5. Vďaka tomuto výsledku je možné tvrdiť, že prototyp testovacej stanice pre domazávanie plastickým mazivom je funkčný. Celý priebeh testu je možné vidieť v prílohe 4.



Obr. 6-4 Priebeh záveru testu s bežným intervalovým mazaním



Obr. 6-5 Únavové poškodenie pri teste s bežným intervalovým mazaním

6.3.2 Testy s iniciovaným poškodením

6.3.2

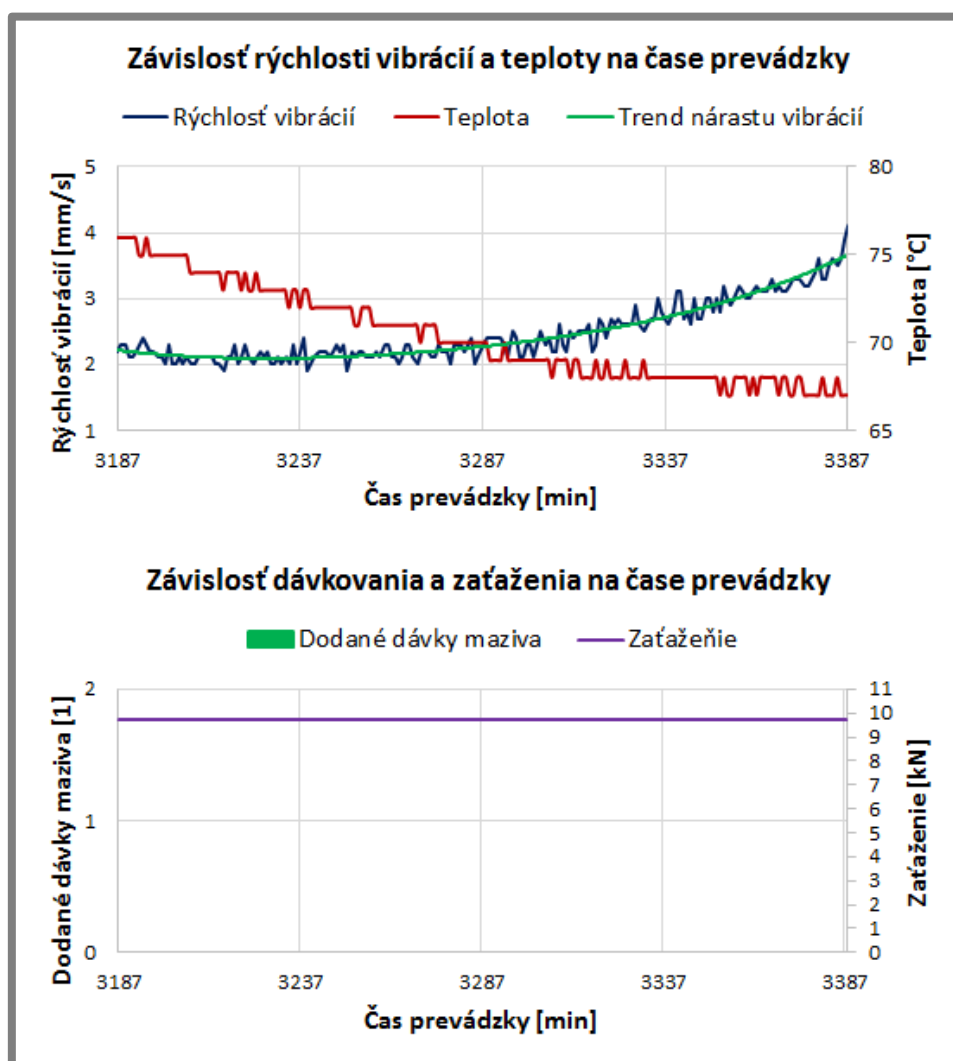
Prevedené boli tri testy s rôznymi priermi preliačín (200, 270 a 300 μm). Celkové priebehy týchto testov sú znázornené v prílohe 4 a podrobnejšie informácie o vytvorených preliačínach sa nachádzajú v prílohe 2. Ako už bolo spomenuté v diskusii funkčného prototypu testovacej stanice, pri teste s priemerom preliačín 200 μm sa

vyskytol problém so stratou zaťaženia (vibrovanie spodnej páky záťažného mechanizmu). To značne ovplyvnilo dĺžku testu a preto ju nie je možné pokladať za smerodajnú. Pre preliačiny o priemere 200 μm bol preto vytvorený ešte jeden test, avšak tento test bol už skombinovaný s proaktívne riadeným mazaním (viď obr. 6-9 a taktiež podkapitolu 6.3.3). Na základe týchto testov je možné tvrdiť, že veľkosť preliačiny na obežnej dráhe ložiska naozaj skracuje dĺžku testu (viď tab. 5).

Tab. 5 Dĺžky testov s rôzne veľkými preliačninami

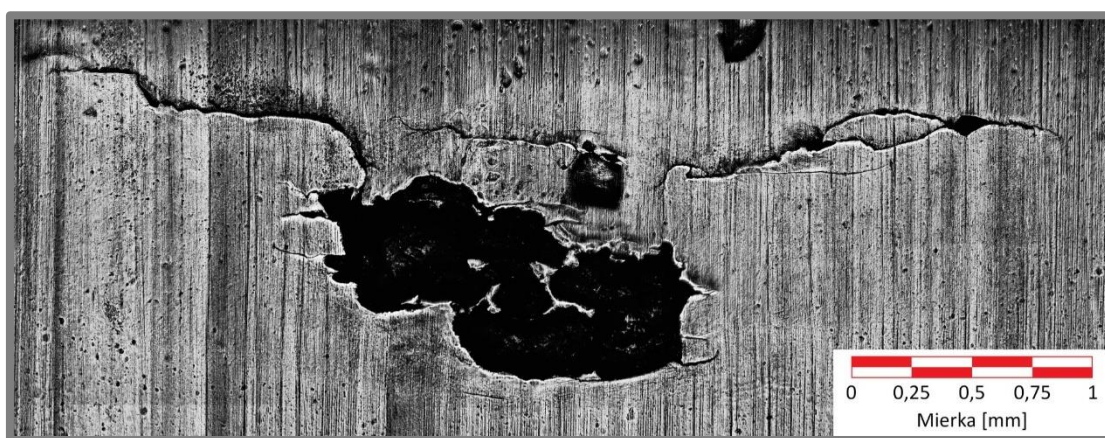
Test s priermi preliačin o danej veľkosti [μm]	Dĺžka testu [hod]
200	127,47
270	56,45
300	19,03

Graf na obr. 6-6 znázorňujú ukážku posledných 200 minút prevádzky testu s iniciovaným poškodením (test s priemerom preliačin o veľkosti 270 μm). Zvyšné grafy sú uvedené v prílohe 3.

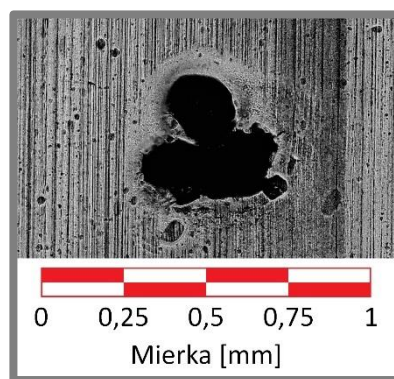


Obr. 6-6 Priebeh záveru testu s iniciovaným poškodením

V týchto grafoch je možné vidieť trend vibrácií, ktorý má rastúci charakter (neskôr bude zrovnaný s testom, ktorý mal proaktívne riadené mazanie). V prípade testu s preliačninami o veľkosti 200 μm bolo nájdené únavové poškodenie v oblasti mimo preliačnin (viď príloha 3). Z tohto dôvodu boli odskúšané preliačiny o veľkosti 300 μm . U tohto testu boli únavové poškodenia vytvorené práve v miestach preliačnin, avšak boli sprevádzane výraznými trhlinami (viď príloha 3). Ďalej boli odskúšané taktiež preliačiny o veľkosti 270 μm . Po dobehnutí testu bolo nájdené únavové poškodenie v mieste preliačiny, ktoré už bolo viac podobné pittingu, avšak taktiež bolo sprevádzané trhlinami. Zároveň bolo nájdené aj únavové poškodenie v oblasti preliačiny, ktoré nebolo sprevádzané trhlinami (pitting v počiatočnej fáze). Tieto únavové poškodenia sú zobrazené na obr. 6-7 a 6-8. Z grafu je taktiež možné vidieť menší pokles teploty, ktorý však neodpovedá bežnému priebehu testu. Ten však mohol byť spôsobený dodaním dávky maziva tesne pred zobrazeným intervalom.



Obr. 6-7 Únavové poškodenie pri teste s iniciovaným poškodením



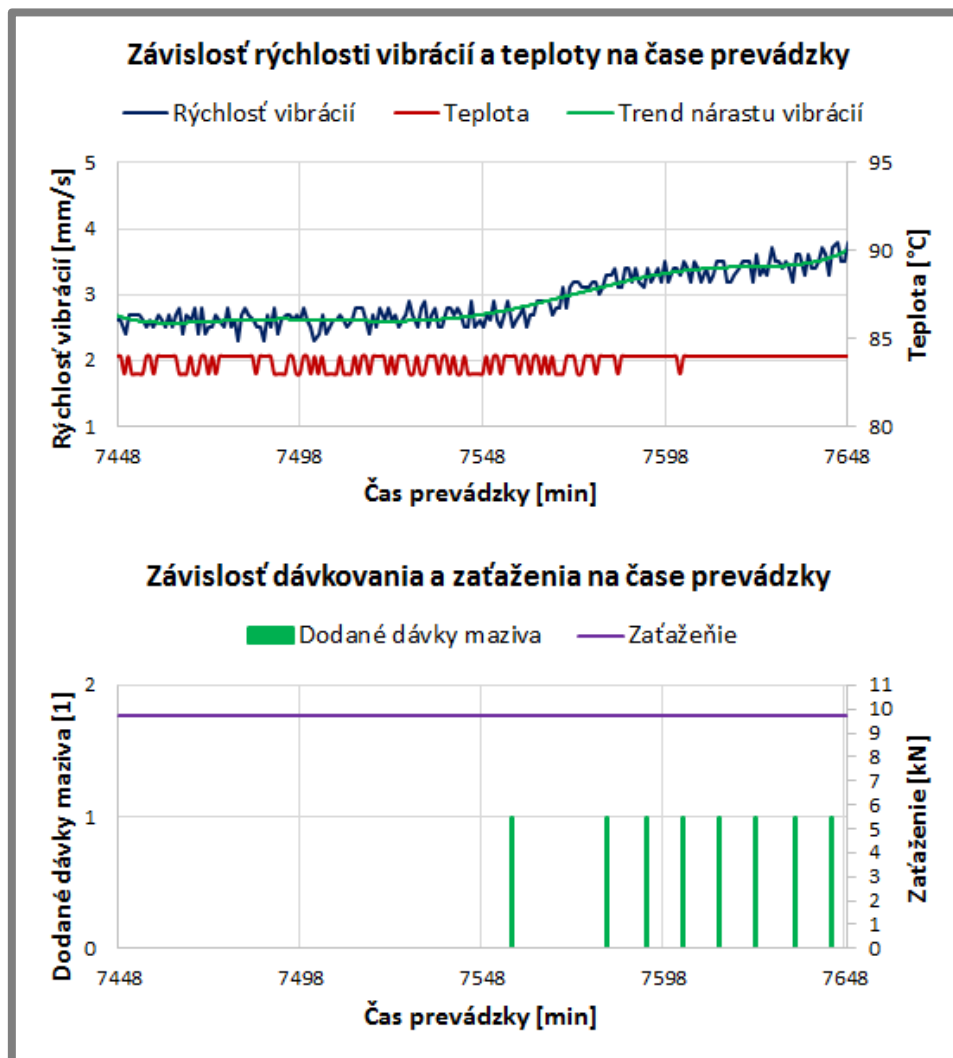
Obr. 6-8 Počiatočná fáza pittingu (test s iniciovaným poškodením)

6.3.3 Test s proaktívne riadeným mazaním

6.3.3

Posledným overovacím experimentom bol test s proaktívne riadeným mazaním, ktorý mal slúžiť hlavne pre overenie platformy pre riadenie mazania. Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, tento test bol prevedený s preliačninami o priemere 200 μm . Celý priebeh je znázornený v prílohe 4. Z grafu na obr. 6-9 je vidieť rastúci trend, ktorý nemá rovnaký tvar ako u predchádzajúceho testu (viď priebeh testu s iniciova-

ným poškodením na obr. 6-6). Proaktívne riadenie mazania má teda vplyv na priebeh testu avšak pre konkrétne tvrdenia by bolo potrebné previesť väčšie množstvo testov. Po ukončení testu bola stanica rozobraná a nájdené bolo únavové poškodenie (pitting), vid' obr. 6-10. Ten sa však nachádzal opäť v mieste medzi preliačninami.



Obr. 6-9 Priebeh záveru testu s proaktívnym riadením mazania



Obr. 6-10 Únavové poškodenie pri teste s proaktívnym riadením mazaním

Pri porovnaní tohto výsledku s predchádzajúcim testom, ktorý mal taktiež preliačiny o veľkosti priemeru 200 μm , bola nájdená približná zhoda týkajúca sa vzdialenosti vytvoreného únavového poškodenia od jednej z preliačín. Dôvodom môže byť dynamické chovanie sústavy. Pravdepodobne dochádza k tlakovému rázu (z dôvodu preliačiny), ktorý sa však neprejaví ihneď za preliačinou, ale až v určitej vzdialenosti od nej.

6.4 Celkové zhodnotenie funkčnosti systému

6.4

Po odladení testovacej stanice a odskúšaní riadiacej platformy behom overovacích experimentov neboli nájdené žiadne ďalšie nedostatky. Zariadenie je teda schopné plniť úlohu na ktorú bolo zamýšľané. Prípadnú pozornosť by si vyžadovalo rozšírenie riadiaceho programu, ktorý je síce funkčný, avšak momentálne funguje iba na jednoduchej podmienke.

7 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá návrhom systému pre testovanie valivých ložísk s premennými parametrami mazania. Systém umožňuje riadiť dávkovanie plastického maziva na základe diagnostických veličín.

V úvodnej časti diplomovej práce bol zhrnutý súčasný stav poznania, v ktorom bol rozobraný význam mazania ložísk a možnosti prívodu plastického maziva k ložisku. Následne bol taktiež rozobraný aj význam automatického mazania spolu s možnosťami riadenia dávkovania na základe patentových riešení. Súčasťou tejto kapitoly je taktiež aj súčasný stav testovacích staníc na Ústave konštruování a spomenutá prípadná možnosť urýchlenia únavových testov. Tieto poznatky boli následne zhodnotené.

Ďalej sa práca zaoberá konštrukčnými úpravami testovacej stanice a vytvorením platformy pre riadenie dávkovania mazania. Pri konštrukčných úpravách testovacej stanice boli navrhnuté dva varianty. Po zostavení variantu A nasledovalo jeho kritické zhodnotenie. Na základe kritického zhodnotenia bol navrhnutý variant B, ktorý bol následne podrobnejšie rozobraný a spracovaný vo forme výkresovej dokumentácie. Pri návrhu platformy bol podstatný hlavne výber programovacieho prostredia. Zvolený bol softvér LabVIEW, pre ktorý bol následne vymyslený princíp prepojenia súčastí. Vytvorený bol taktiež aj základný riadiaci program. Kapitola Konštrukčné riešenie obsahovala v závere popis montáže testovacej stanice, zostavenie riadiacej platformy, vytváranie preliačín a realizácia experimentov.

V kapitole Diskusia boli následne rozobrané overovacie experimenty, ktoré potvrdili funkčnosť upravenej testovacej stanice a platformy pre riadenie mazania. Potvrdili sa taktiež aj poznatky týkajúce sa urýchlenia únavových testov na základe vytvárania preliačín do obežnej dráhy ložiska.

V rámci riešenia diplomovej práce boli splnené všetky ciele. Celkovým výsledkom je funkčná vzorka riadiaceho systému určená pre ďalší vývoj. Funkčnosť bola overená na základe overovacích testov.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] Zásady pro volbu a použití ložisek. *ZKL* [online]. b.r. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/3-zasady-pro-volbu-pouziti-lozisek>
- [2] HARNOY, Avraham. *Bearing design in machinery: engineering tribology and lubrication*. New York: Marcel Dekker, 2003. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 147. ISBN 08-247-0703-6.
- [3] Mazání ložisek. *ZKL* [online]. b.r. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/9-mazani-lozisek>
- [4] Mazání plastickým mazivem. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/lubrication/grease-lubrication/index.html>
- [5] SKF COMMUNICATION SUPPORT CENTRE. *6000_CS_00_03_Urceni velikosti loziska*. 2007, 38 s. Dostupné také z: http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_00_03_Urceni%20velikosti%20loziska.pdf
- [6] *Lubrication of Rolling Bearings*. b.r. Dostupné také z: http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_176_de_en.pdf
- [7] Lubrication. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/bearing-housings/split-plummer-block-housings-snl-2-3-5-6-series/lubrication/index.html>
- [8] Manual or Automatic Lubrication? How to Decide. *Machinery Lubrication* [online]. b.r. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://machinerylubrication.com/Read/29285/manual-automatic-lubrication>
- [9] SKF USA INC. Automated condition-based lubrication system. US. PCT. WO 2010077282 A1. 8.7.2010.
- [10] LINCOLN INDUSTRIAL CORPORATION. Method of purging lubricant within a bearing and system using the method. US. PCT. WO 2015161270 A1. 22.10.2015.
- [11] TRICO MFG. CORPORATION. Apparatus and method for lubricant condition control and monitoring. US. Patent Application Publication. US 20040040789 A1. 4.3.2004.
- [12] HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [13] SUCHANEK, D. *Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

- [14] MATSUNAGA, Hisao, Hiroki KOMATA, Junichiro YAMABE, Yoshihiro FUKUSHIMA a Saburo MATSUOKA. Effect of Size and Depth of Small Defect on the Rolling Contact Fatigue Strength of Bearing Steel JIS-SUJ2. *Procedia Materials Science* [online]. 2014, **3**, 1663-1668 [cit. 2016-04-29]. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.268. ISSN 22118128. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211812814002697>
- [15] MORALES-ESPEJEL, Guillermo E a Antonio GABELLI. The progression of surface rolling contact fatigue damage of rolling bearings. *Evolution*. **2016**(1).
- [16] VIDITECH. *Uživatelský manuál přístroje VIDITECH 2000CV VIDITECH 2000CV/E*. b.r. Dostupné také z: http://www.viditech.cz/files/6813/7473/3714/Uivatelsk_manul_pstroje_Viditech_2000CV_rev_1_3_CZ.pdf
- [17] Cylindrical roller bearings, single row: NU 205 ECP. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <http://www.skf.com/my/products/bearings-units-housings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings/single-row-cylindrical-roller-bearings/single-row/index.html?designation=NU%20205%20ECP>
- [18] Trvanlivost podle SKF. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/selecting-bearing-size/using-life-equations/skf-rating-life/index.html>
- [19] Deep groove ball bearings: 6305-2Z. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6305-2Z>
- [20] SKF Bearing Calculator. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/>
- [21] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [22] Přehled vlastností oceli 16MnCr5 (16MnCrS5). *Bohdan Bolzano* [online]. b.r. [cit. 2016-12-16]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-cementovani-podle-en-10084/prehled-vlastnosti-oceli-16mncr5>
- [23] *TT 34: MICROPROCESSOR-BASED DIGITAL ELECTRONIC TIMER*. b.r. Dostupné také z: <http://www.t-uk.co.uk/guides/MTT34i.pdf>
- [24] FAG KUGELFISCHER GEORG SCHÄFER AG. *Rolling Bearing Lubrication*. b.r. Dostupné také z: <http://mountingmanager.schaeffler.com/library/library.pdf.wl81.115.e.pdf>
- [25] VIDITECH. *VDTControl Center VDTControl Server*. b.r. Dostupné také z: http://viditech.cz/files/9214/5811/0796/20160315.1CZE_VDTCC2_manual.pdf

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

9

9.1 Zoznam použitých skratiek

9.1

<u>Skratka</u>	<u>Význam</u>
t_1	aktuálna hodnota primárneho časovača
t_2	aktuálna hodnota sekundárneho časovača
A_L	dodané množstvo maziva
L_t	limitná hodnota teploty
L_{t1}	primárny interval dodania dávky maziva
L_{t2}	sekundárny interval dodania dávky maziva
L_v	limitná hodnota rýchlostí vibrácií
L_Q	množstvo maziva
PTFE	Polytetrafluóretylén
S	signál snímača
S_{it}	čítaný signál teploty z monitorovacej jednotky
S_{iv}	čítaný signál rýchlostí vibrácií z monitorovacej jednotky
S_{kt}	kalibrovaný signál teploty
S_{kv}	kalibrovaný signál rýchlostí vibrácií
S_o	výstupný signál pre riadenie dávkovania maziva
S_A	poplašný signál
S_n	snímače
T	aktuálny čas počítajúceho sa intervalu
T_A	limitný časový interval
T_C	doba zadržania maziva
T_V	prahová hodnota, ktorá zodpovedá životnosti množstva maziva
V_{P1}	vopred stanovená prahová hodnota (pri snímaní vibrácií)
V_{P2}	vopred stanovená prahová hodnota (pri snímaní tlaku)
V_S	hodnota signáli snímača
N_A	počet aplikovaných mazaní
NA_p	limitný počet mazaní (resp. limitný časový interval)

9.2 Zoznam použitých symbolov a veličín

9.2

<u>Veličina</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Význam</u>
β	1	súčiniteľ vrubu pre ohyb
β_τ	1	súčiniteľ vrubu pre krut
η_c	1	súčiniteľ znečistenia (vid' príloha 1)
κ	1	viskózný pomer (vid' príloha 1)
ν_1	mm ² /s	požadovaná kinematická viskozita pre $\kappa = 1$ (vid' príloha 1)
σ_{Co}	MPa	medza únavy materiálu
σ'_{Co}	MPa	korigovaná medza únavy v kritickom mieste súčiastky
σ_o	MPa	ohybové napätie

ϕ_x	mm	priemer preliačiny v smere osi X (vid' príloha 2)
ϕ_y	mm	priemer preliačiny v smere osi Y (vid' príloha 2)
ϕd_p	mm	priemer vnútorného krúžku podporného ložiska
ϕd_t	mm	priemer vnútorného krúžku testovaného ložiska
ϕD_p	mm	priemer vonkajšieho krúžku podporného ložiska
ϕD_t	mm	priemer vonkajšieho krúžku testovaného ložiska
a_1	1	súčiniteľ spoľahlivosti
a_{skf}	1	súčiniteľ trvanlivosti podľa SKF
d	mm	priemer hriadeľa
d_i	mm	vnútorný priemer ložiska
d_m	mm	stredný priemer ložiska
d_v	μm	priemer diery
f_1	1	redukčný súčiniteľ vplyvu prachu a vlhkosti na kontaktné plochy ložiska
f_2	1	redukčný súčiniteľ vplyvu nárazového zaťaženia a vibrácií
f_3	1	redukčný súčiniteľ vplyvu vysokej teploty ložiska
f_4	1	redukčný súčiniteľ vplyvu vysokých zaťažení
f_5	1	redukčný súčiniteľ vplyvu prúdu vzduchu prechádzajúceho ložiskom
f_6	1	redukčný súčiniteľ vplyvu odstredivého efektu alebo vertikálneho hriadeľa v závislosti od tesnenia
h_{px}	mm	hlbka preliačiny v smere osi X (vid' príloha 2)
h_{py}	mm	hlbka preliačiny v smere osi Y (vid' príloha 2)
h'	μm	hlbka diery
k_a	1	súčiniteľ vplyvu akosti povrchu
k_b	1	súčiniteľ vplyvu veľkosti telesa
k_c	1	súčiniteľ vplyvu spôsobu zaťažovania
k_d	1	súčiniteľ vplyvu teploty
k_e	1	súčiniteľ spoľahlivosti
k_f	1	súčiniteľ zahrňujúci ďalšie vplyvy
k_k	1	bezpečnosť k medznému stavu pružnosti
k_u	1	bezpečnosť k medznému stavu únavy
l	mm	funkčná vzdialenosť medzi podpornými ložiskami

n_i	min^{-1}	otáčky
p	1	exponent rovnice trvanlivosti
q_{max}	GPa	maximálny kontaktný tlak
s_{px}	mm	výška hrany preliačiny v smere osi X (vid' príloha 2)
s_{py}	mm	výška hrany preliačiny v smere osi Y (vid' príloha 2)
t_f	hod	interval mazania
t_{fq}	hod	redukovaný interval mazania
w	mm	maximálny priehyb hriadeľa
A	mm/min	otáčkové číslo
B_p	mm	šírka podporného ložiska
B_t	mm	šírka testovaného ložiska
C	kN	základná dynamická únosnosť
D_o	mm	vonkajší priemer ložiska
E	GPa	modul pružnosti v ťahu
F	kN	zaťažujúca sila
F_a	kN	axiálne zaťaženie podporného ložiska (vid' príloha 1)
F_r	kN	radiálne zaťaženie podporného ložiska (vid' príloha 1)
F_A	kN	reakčná sila prvého podporného ložiska
F_B	kN	reakčná sila druhého podporného ložiska
I	mm^4	kvadratický moment prierezu v ohybe
L_{nmh}	hod	trvanlivosť podľa SKF (pri 100 – n % spoľahlivosti)
L_{10}	hod	limitovaná životnosť plastického maziva (vid' príloha 1)
L_{10h}	hod	základná trvanlivosť (pri 90 % spoľahlivosti) (vid' príloha 1)
L_{10mh}	hod	trvanlivosť podľa SKF (pri 90 % spoľahlivosti)
M_{Km}	Nmm	nepremenný krútiaci moment
M_O	Nmm	maximálny ohybový moment
N_f	1	počet cyklov do zlyhania
P	kN	ekvivalentný dynamické zaťaženie ložiska
R_e	MPa	medza klzu
$R_{m\ min}$	MPa	minimálna medza pevnosti v ťahu
W_O	mm^3	modul prierezu v ohybe

10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 2-1 Domazávanie pomocou mazacieho otvoru vo vonkajšom krúžku [6]	18
Obr. 2-2 Domazávanie zo strany [7]	19
Obr. 2-3 Domazávanie zo strany pre domčeky s V-krúžkami [7]	19
Obr. 2-4 Cielené domazávanie zo strany [6]	20
Obr. 2-5 Zníženie rizika zlyhania [8]	21
Obr. 2-6 Princíp riadenia mazacieho systému od SKF USA INC. [9]	21
Obr. 2-7 Princíp riadenia mazania od Lincoln Industrial Corporation [10]	22
Obr. 2-8 Princíp riadenia mazania od Trico Mfg. Corporation [11]	23
Obr. 2-9 Experimentálna stanica SA67 [13]	24
Obr. 2-10 Sprevodovanie otáčok a zmena systému zaťažovania	24
Obr. 2-11 Konštrukčné úpravy experimentálnych staníc pre valčekové ložiská	25
Obr. 2-12 Závislosť max. kontakt. tlaku na počte cyklov do zlyhania [14]	26
Obr. 2-13 Mikrofotografie rezov poškodených vzoriek [14]	26
Obr. 2-14 Experiment. výsledky šírenia trhliny z umelo vytvorenej preliačiny [15]	27
Obr. 2-15 Elipsa ukazujúca približnú veľkosť Hertzovho kontaktu [15]	27
Obr. 4-1 Konceptné riešenie	30
Obr. 4-2 Konceptný návrh experimentálnej stanice – Variant A, Rez A	31
Obr. 4-3 Konceptný návrh experimentálnej stanice – Variant A, Rez B	32
Obr. 4-4 Konceptný návrh experimentálnej stanice – Variant B, Rez A	33
Obr. 4-5 Konceptný návrh experimentálnej stanice – Variant B, Rez B	34
Obr. 4-6 Základný princíp riadenia	34
Obr. 5-1 Ložisko NU 205 ECP [17] – upravené	36
Obr. 5-2 Ložisko 6305-2Z [19] – upravené	37
Obr. 5-3 Umiestnenie testovaného ložiska	38
Obr. 5-4 Spôsob domazávania testovaného ložiska	39
Obr. 5-5 Rozmiestnenie súčastí na hriadeli	40
Obr. 5-6 Privedenie maziva do testovaného ložiska	42
Obr. 5-7 Umiestnenie axiálne vodiaceho ložiska	43
Obr. 5-8 Umiestnenie axiálne voľného podporného ložiska	43
Obr. 5-9 Mazacia jednotka	44
Obr. 5-10 Schematický návrh pripojenia platformy pre riadenie mazania	44
Obr. 5-11 Platforma pre riadenie mazania podľa diagnostických veličín	45
Obr. 5-12 Princíp riadiaceho programu	46
Obr. 5-13 Riadiaci program	47
Obr. 5-14 Zostavená testovacia stanica	48
Obr. 5-15 Implementácia riadiacej elektroniky	49
Obr. 5-16 Vytváranie preliačín pomocou Rockwellového indenteru	49
Obr. 5-17 Ukážka vytvorenej preliačiny o priemere 300 μm	50
Obr. 6-1 Kalibračné krivky a predpisy	53
Obr. 6-2 Priebeh po dodaní piatich dávok maziva	55
Obr. 6-3 Priebeh po dodaní desiatich dávok maziva	56
Obr. 6-4 Priebeh záveru testu s bežným intervalovým mazaním	57
Obr. 6-5 Únavové poškodenie pri teste s bežným intervalovým mazaním	57
Obr. 6-6 Priebeh záveru testu s iniciovaným poškodením	58
Obr. 6-7 Únavové poškodenie pri teste s iniciovaným poškodením	59

Obr. 6-8 Počiatočná fáza pitingu (test s iniciovaným poškodením)	59
Obr. 6-9 Pribeh záveru testu s proaktívnym riadením mazania	60
Obr. 6-10 Únavové poškodenie pri teste s proaktívne riadeným mazaním	60

11 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Rýchlostne rozsahy radiálnych ložísk mazaných plastickým mazivom [4]	17
Tab. 2 Základné údaje ložiska NU 205 ECP [17]	36
Tab. 3 Základné údaje ložiska 6305-2Z [19]	37
Tab. 4 Mechanické vlastnosti ocele 16MnCr5 [22]	40
Tab. 5 Dĺžky testov s rôzne veľkými preliačninami	58

12 ZOZNAM PRÍLOH

12

Príloha 1	Výpočet trvanlivosti podporného ložiska
Príloha 2	Vytvorené preliačiny
Príloha 3	Zvyšné výsledky z overovacích experimentov
Príloha 4	Priebehy testov
Príloha 5	Výkresová dokumentácia

PRÍLOHA 1

Výpočet trvanlivosti podporného ložiska pomocou internetovej aplikácie od spoločnosti SKF [20]

Bearing life : 6305-2Z

Input parameters

Select bearing internal radial clearance	Normal internal radial clearance
F_r Radial load	5 kN
F_a Axial load	0 kN
n_i Rotational speed of the inner ring	4200 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	50 °C
η_c specification method	Cleanliness classification(recommended)
Lubricant type and cleanliness	Normal cleanliness (e.g. shielded bearing)
Grease used in the bearing	MT47
Viscosity at 40 °C	70.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	7.3 mm ² /s

Warning

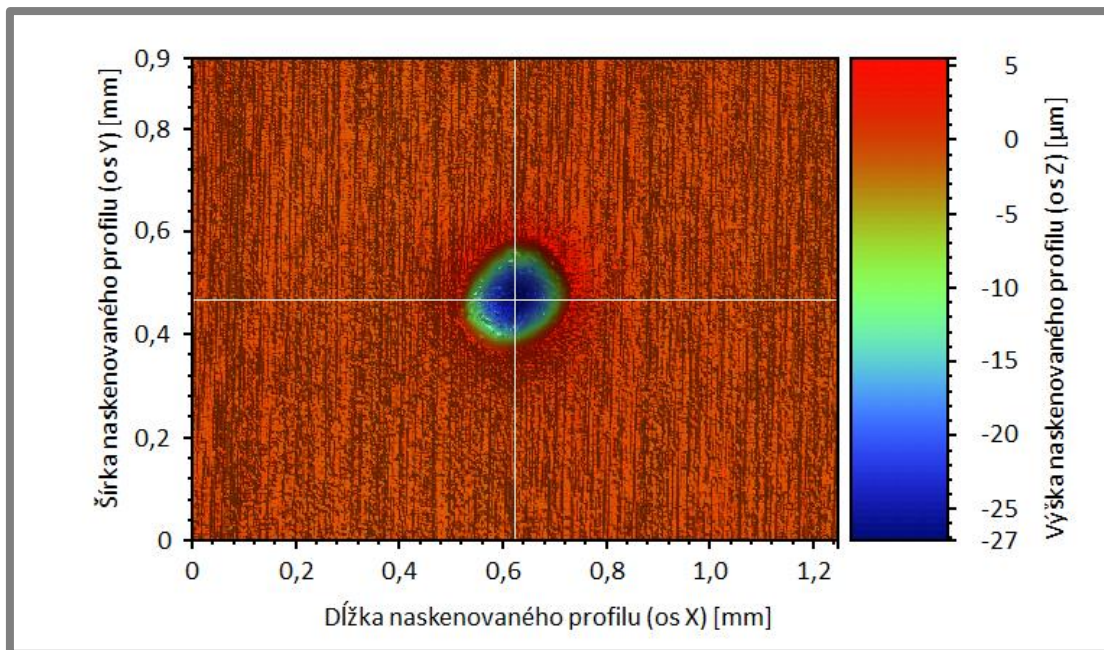
κ=4 gives full surface separation, hence the SKF rating life has no additional lubrication benefit for κ>4. Operating at κ>4 is possible but depending on the speed and lubricant quantity, may lead to higher friction and temperature.

Result

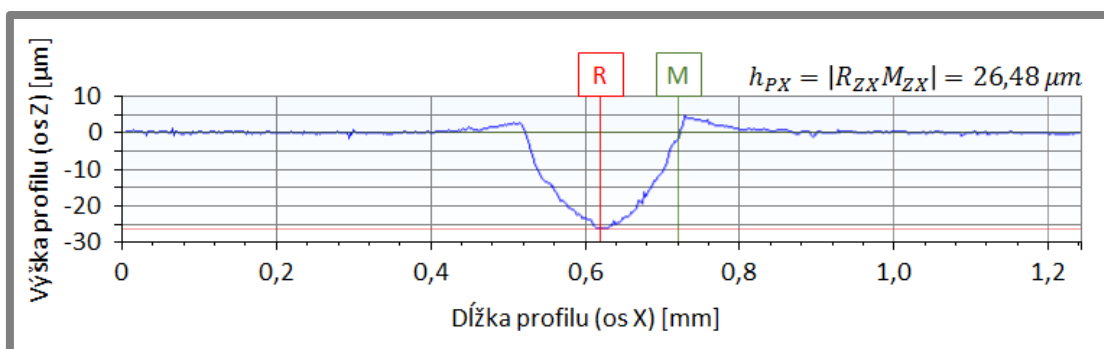
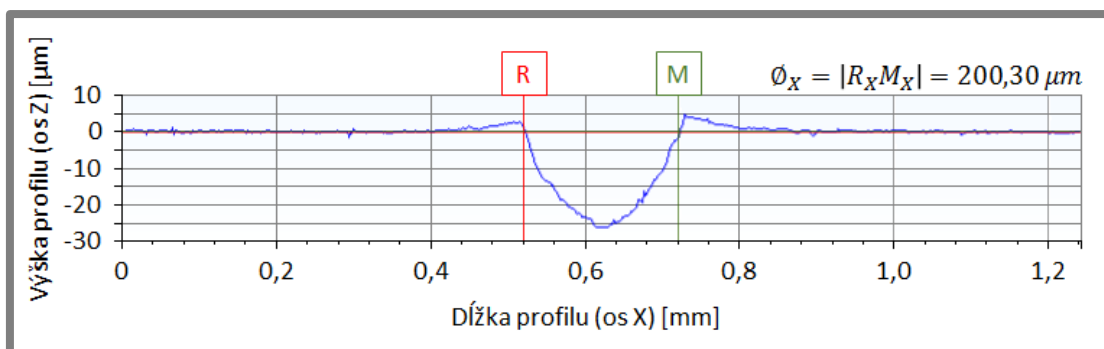
L_{10mh} SKF rating life	1630 hour
a_{SKF} SKF life modification factor a _{SKF}	4
κ Viscosity ratio	4.66
P Equivalent dynamic bearing load	5 kN
η_c Factor for contamination level	0.6
v₁ Required kinematic viscosity for κ=1	8.95 mm ² /s
L_{10h} Basic rating life	410 hour
L₁₀ Capped bearing grease life	14600 hour
C/P Load ratio	4.7

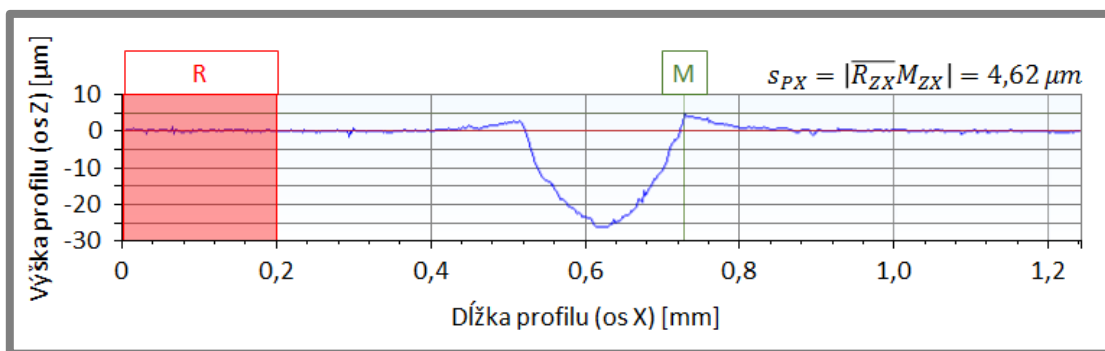
PRÍLOHA 2

Preliačiny o priemere 200 μm

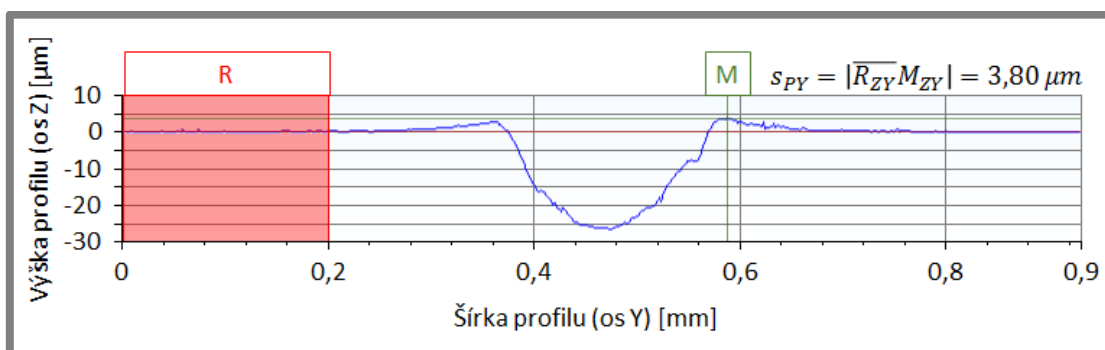
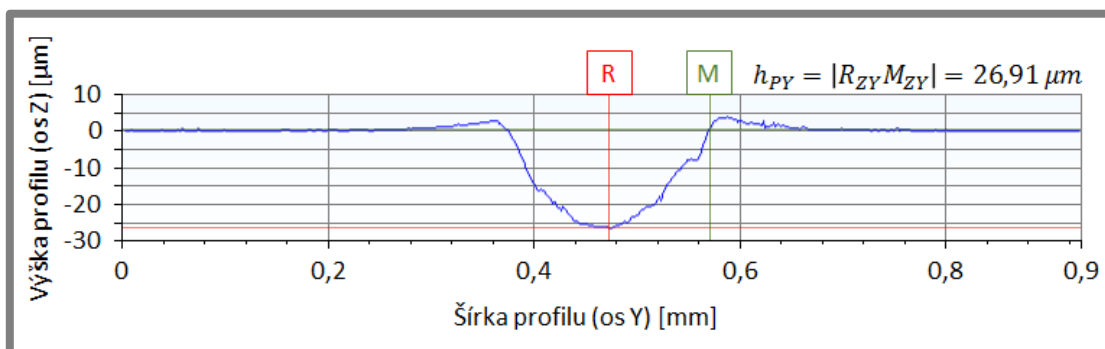
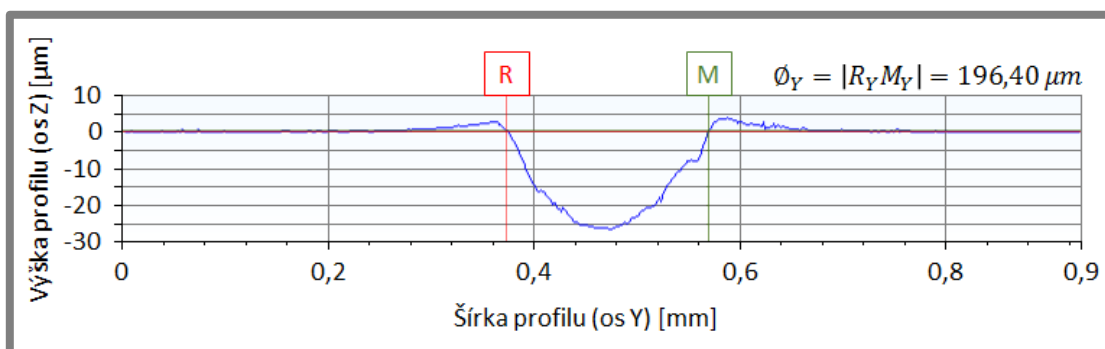


- profil v smere osi X

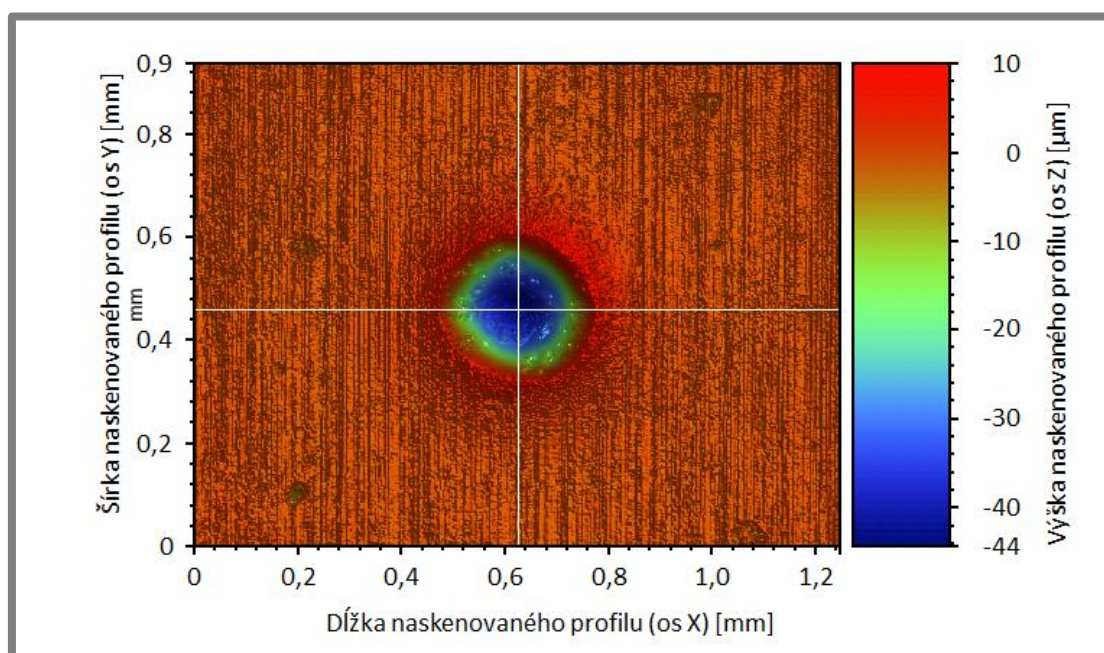




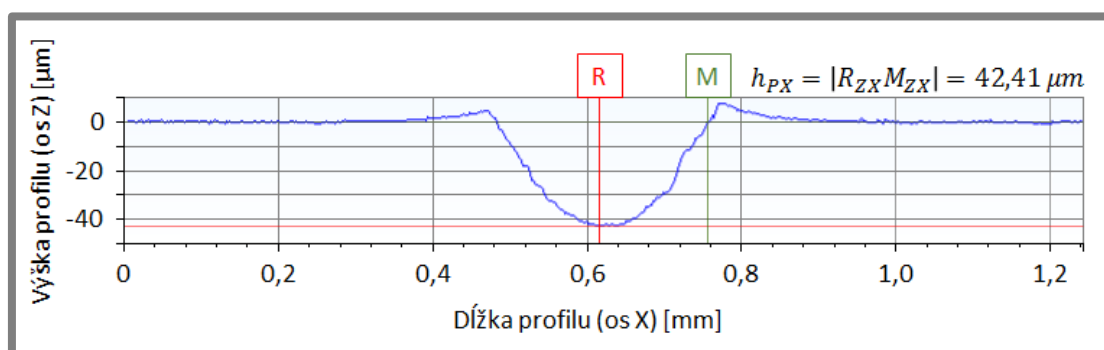
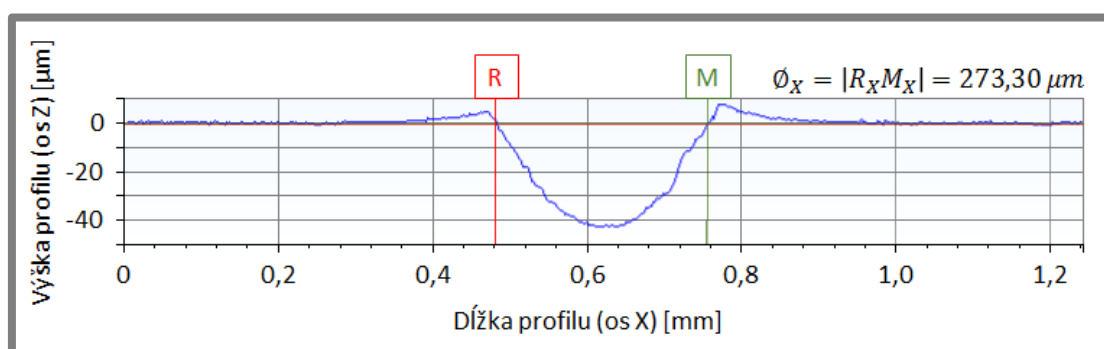
- profil v smere osi Y

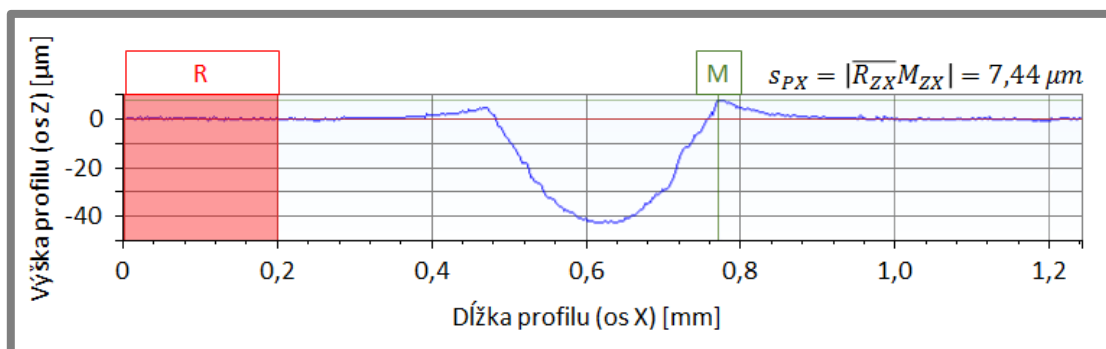


Preliachiny o priemere 270 μm

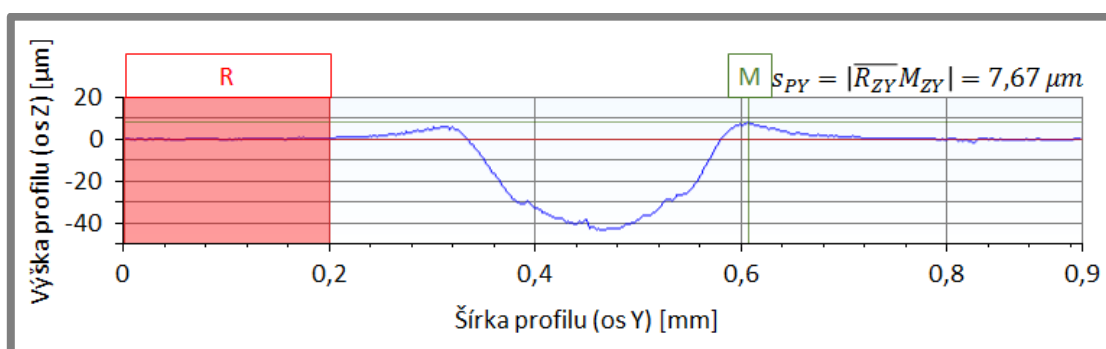
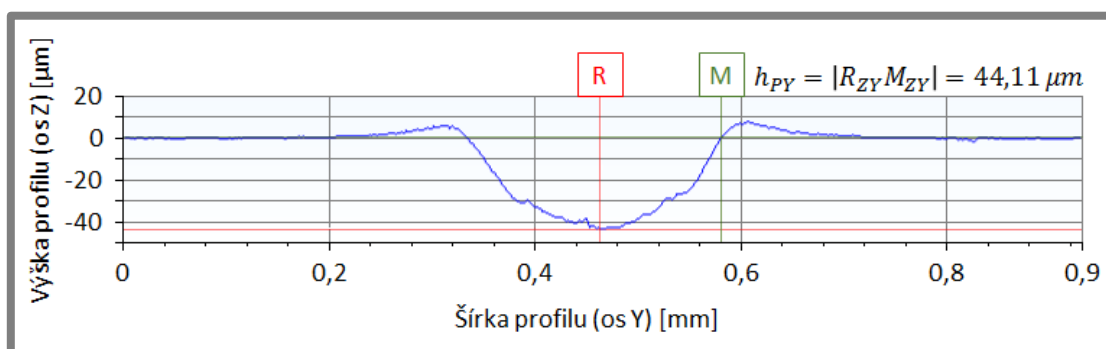
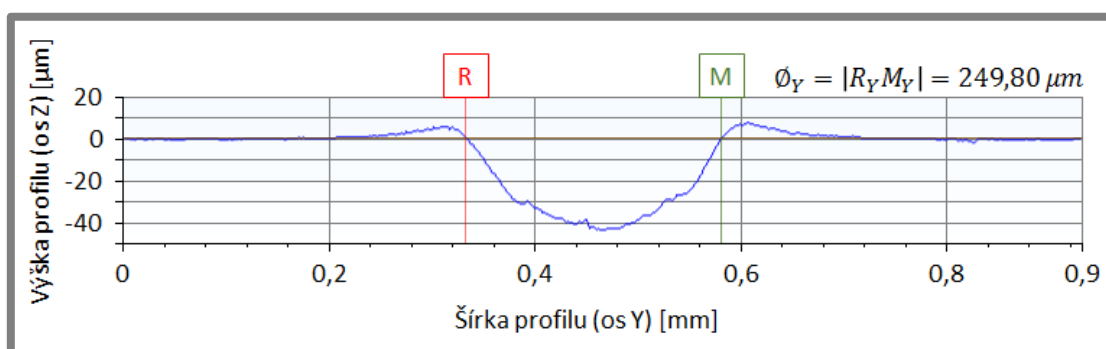


- profil v smere osi X

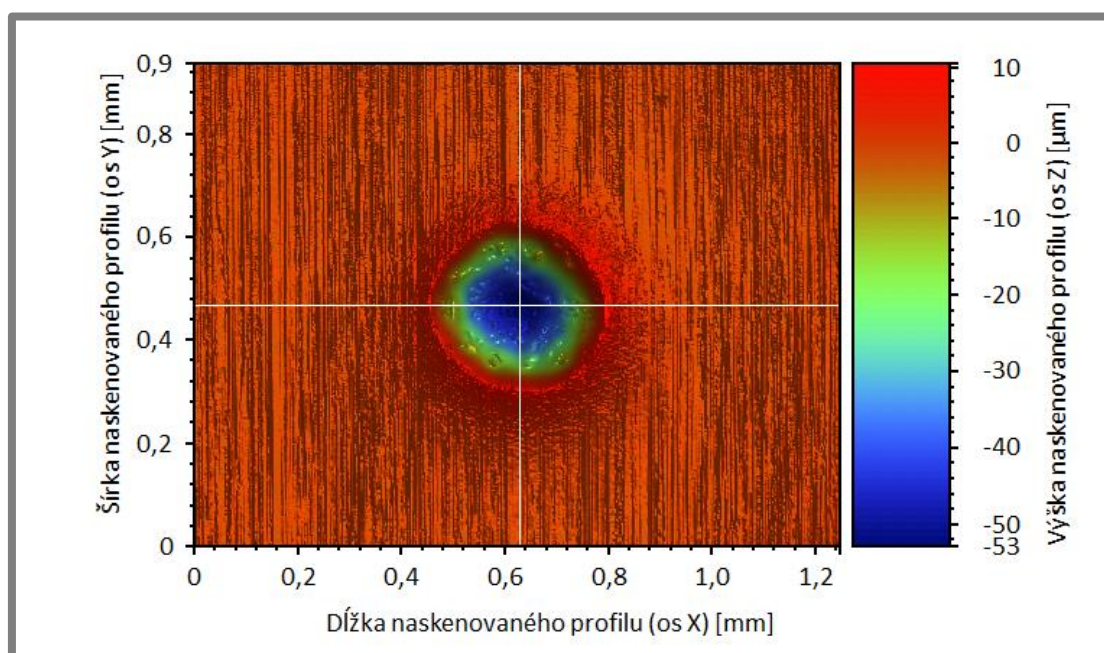




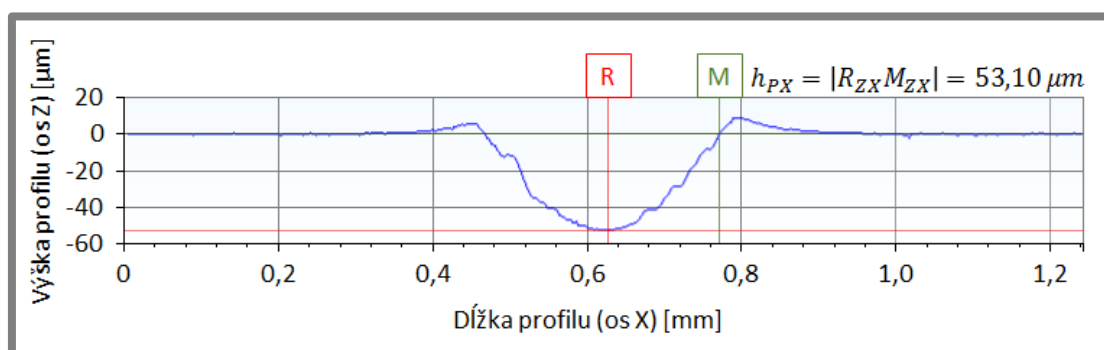
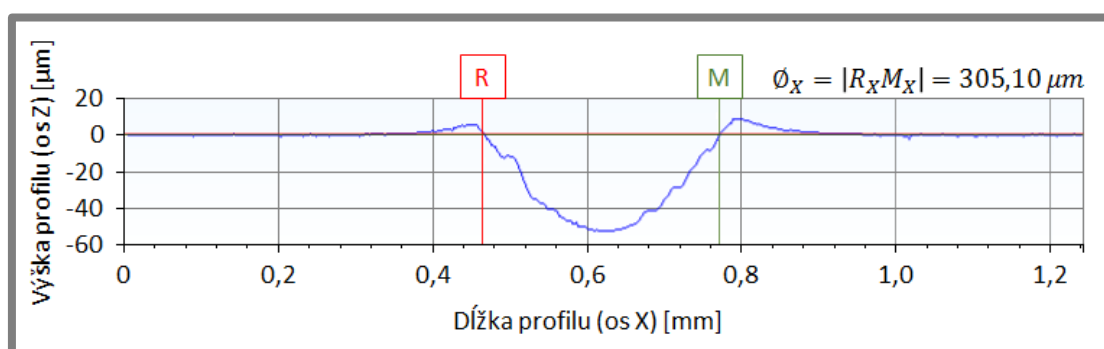
- profil v smere osi Y

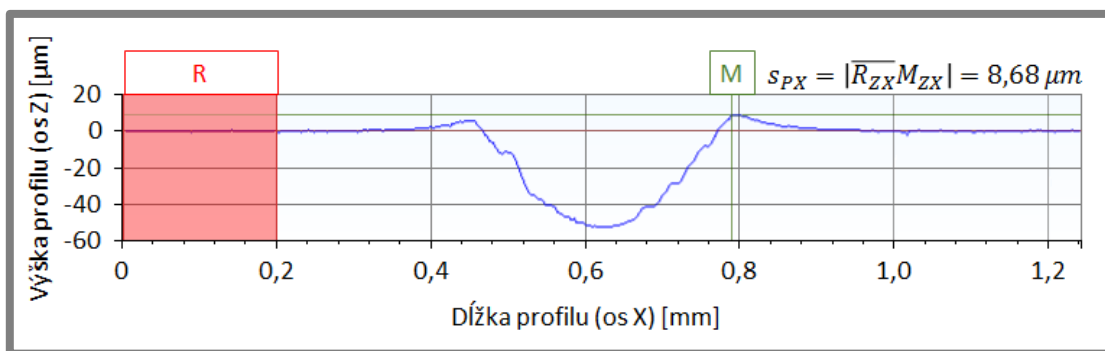


Preliačiny o priemere 300 μm

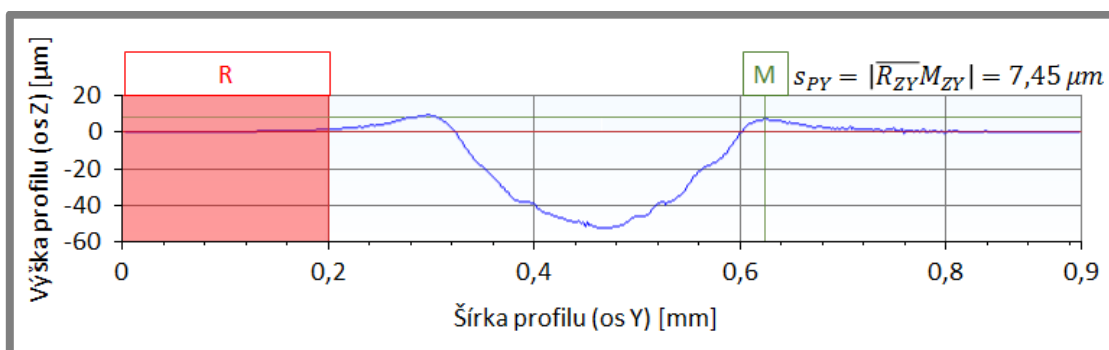
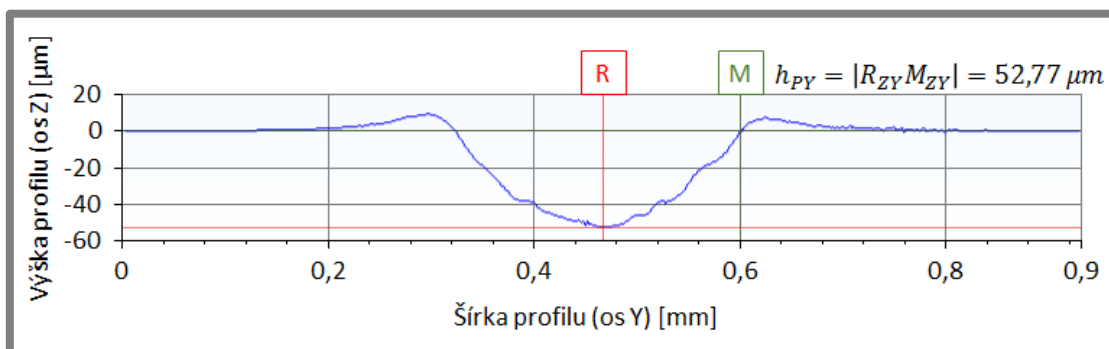
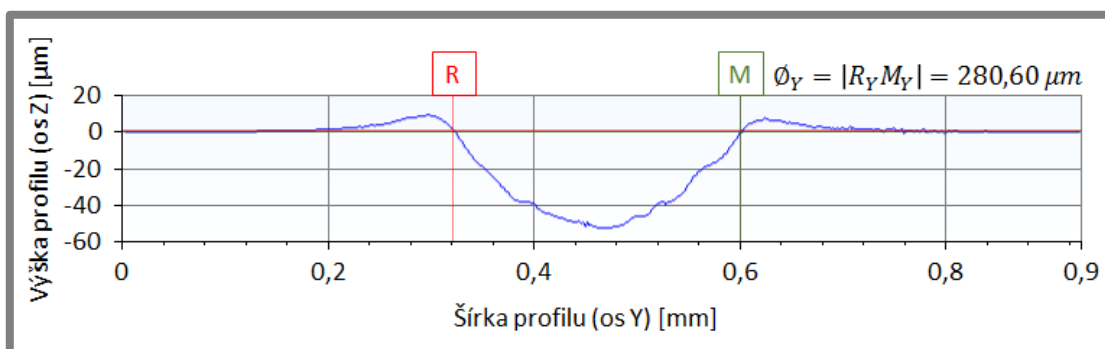


- profil v smere osi X



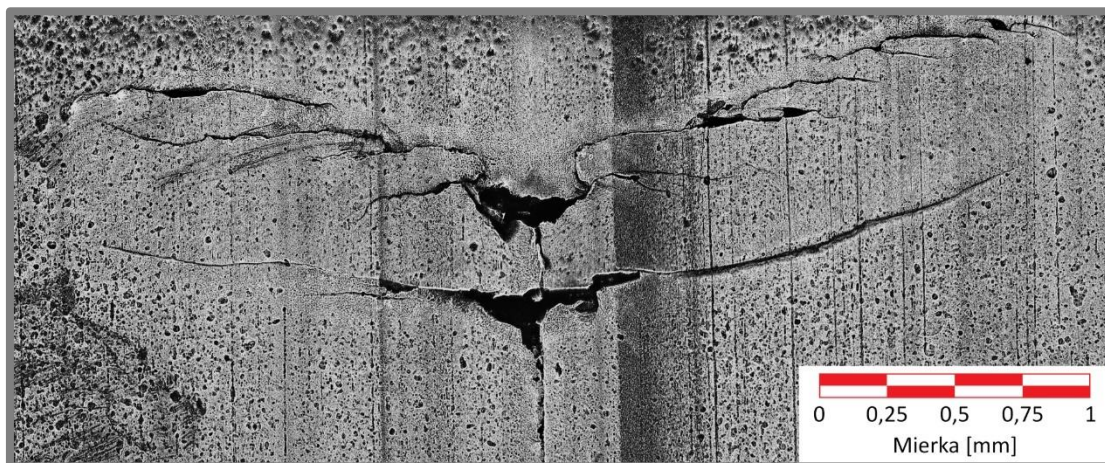
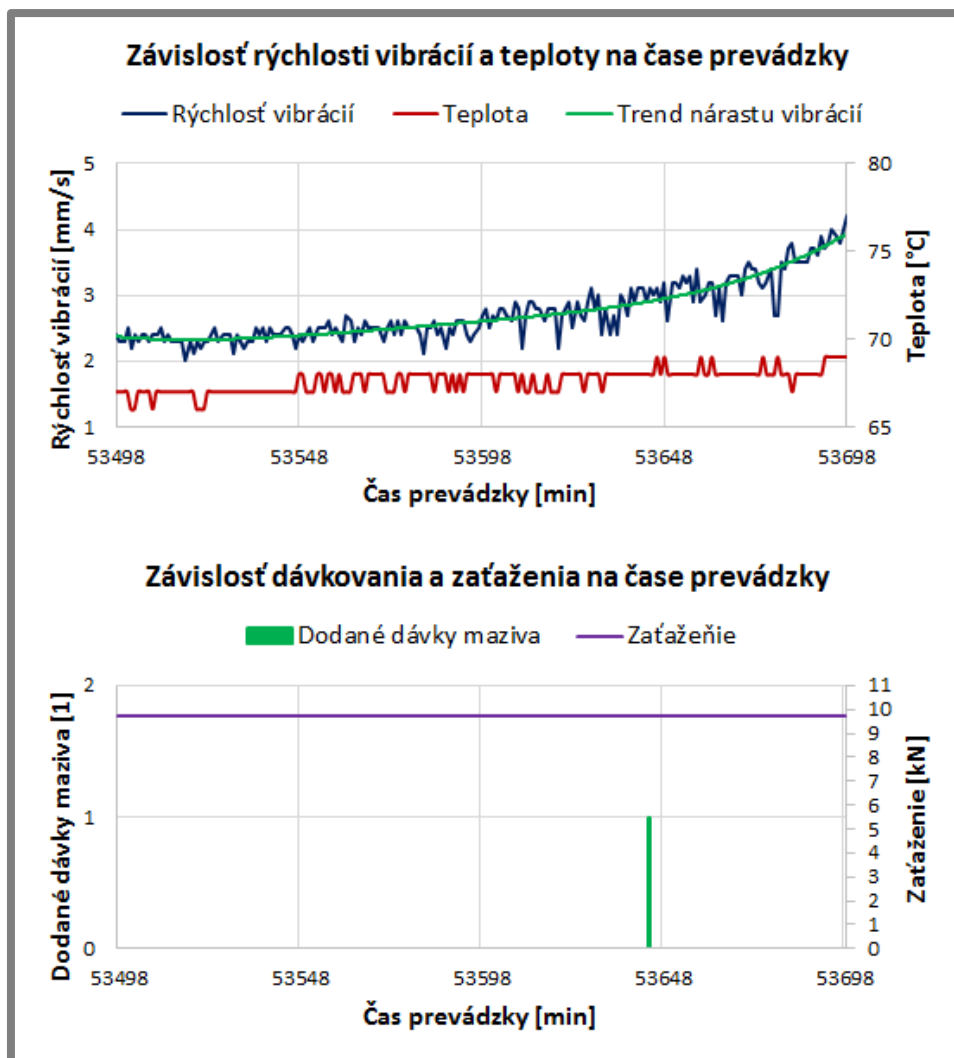


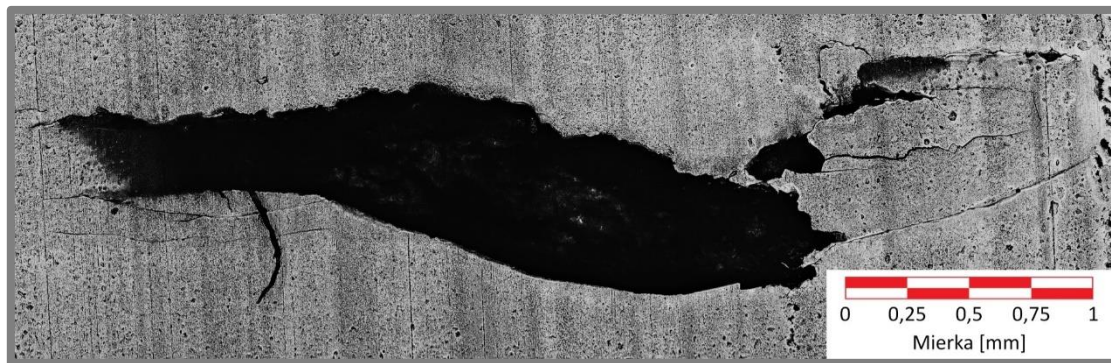
- profil v smere osi Y



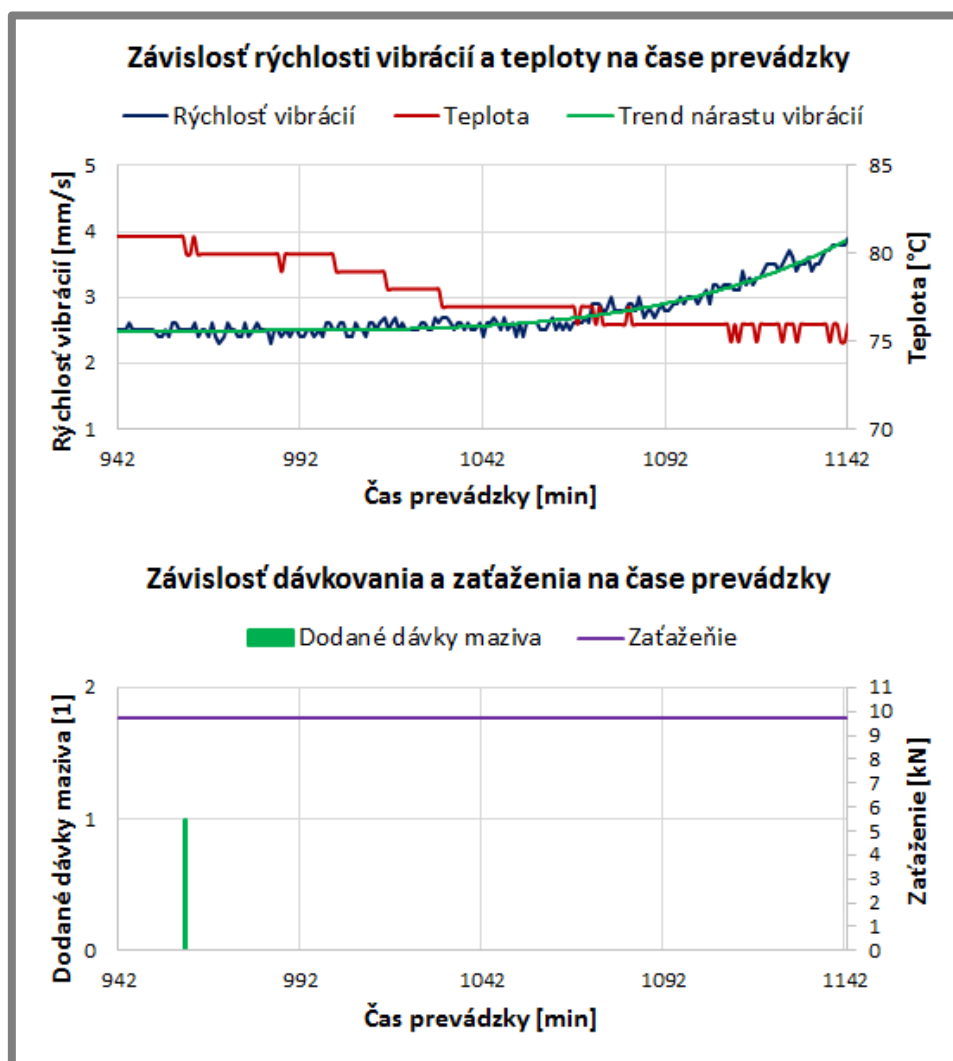
PRÍLOHA 3

Test s iniciovaným poškodením (priemer preliačin 200 μm)





Test s iniciovaným poškodením (priemer preliačin 300 μm)

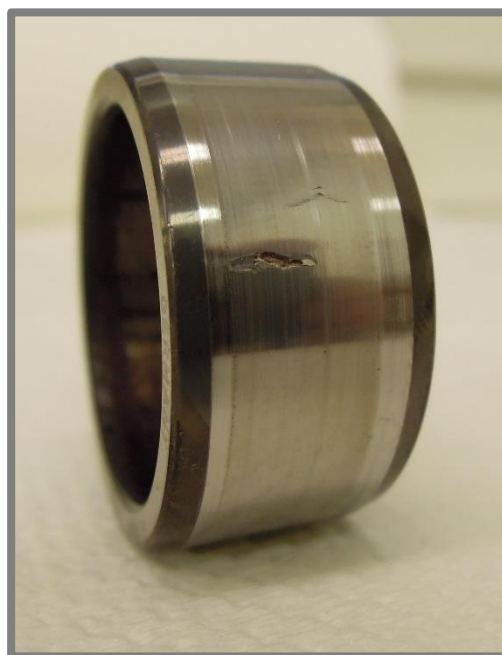




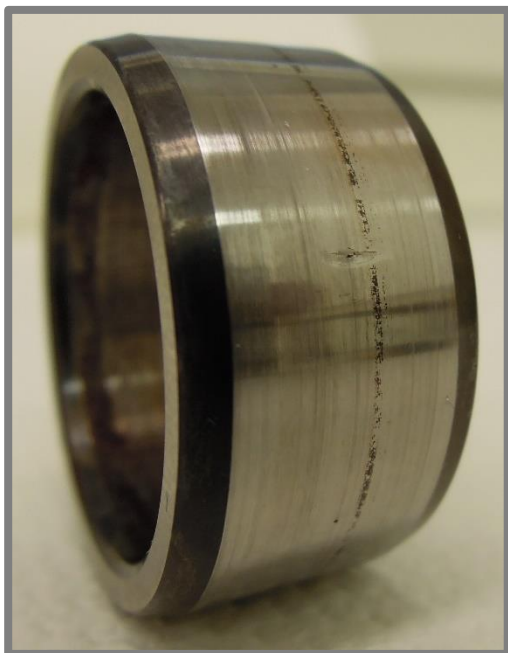
Fotky obežných dráh ložísk po ukončení testov



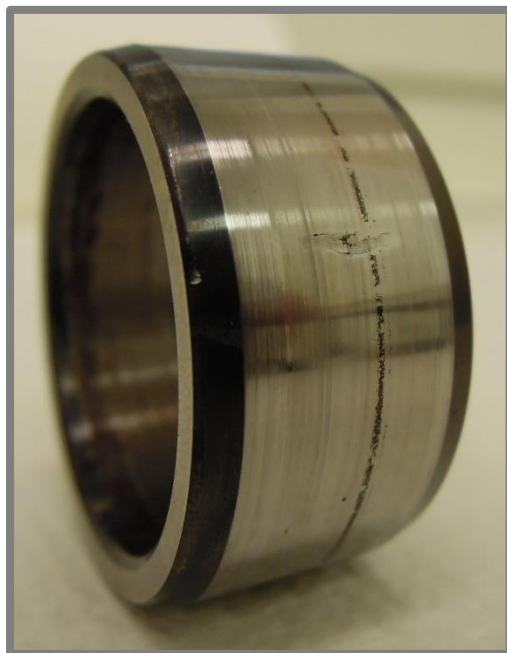
Test s intervalovým mazaním



Test s iniciovaným poškodením
(preliačiny s veľkosti priemeru 200 μm)



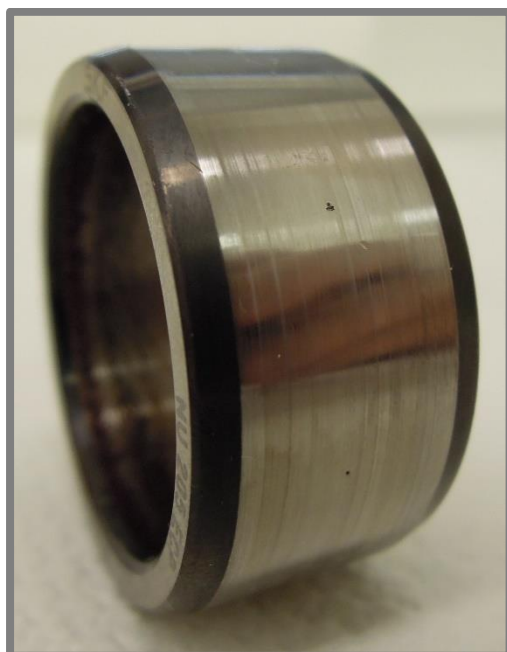
Test s iniciovaným poškodením
(preliačiny s veľkosti priemeru 300 µm)



Test s iniciovaným poškodením
(preliačiny s veľkosti priemeru 300 µm)



Test s iniciovaným poškodením
(preliačiny s veľkosti priemeru 270 µm)



Test s iniciovaným poškodením
(preliačiny s veľkosti priemeru 270 µm)



Test s proaktívne riadeným mazaním
(preliačiny s veľkosti priemeru 200 μm)

PRÍLOHA 4

Zoznam priebehov testov

Test s bežným intervalovým mazaním (rýchlosť vibrácií a teplota)
Test s bežným intervalovým mazaním (kondícia ložiska a teplota)
Test s iniciovaným poškodením, preliačiny 200 µm (rýchlosť vibrácií a teplota)
Test s iniciovaným poškodením, preliačiny 200 µm (kondícia ložiska a teplota)
Test s iniciovaným poškodením, preliačiny 300 µm (rýchlosť vibrácií a teplota)
Test s iniciovaným poškodením, preliačiny 300 µm (kondícia ložiska a teplota)
Test s iniciovaným poškodením, preliačiny 270 µm (rýchlosť vibrácií a teplota)
Test s iniciovaným poškodením, preliačiny 270 µm (kondícia ložiska a teplota)
Test s proaktívne riadeným mazaním, preliačiny 200 µm (rýchlosť vibrácií a teplota)
Test s proaktívne riadeným mazaním, preliačiny 200 µm (kondícia ložiska a teplota)

PRÍLOHA 5

Zoznam výkresov

Testovacia stanica	01-00-A1
Veko	01-01-A2
Veko	01-02-A2
Objímka	01-03-A2
Hriadel'	01-04-A3
Predlžovací čap	01-05-A4
Závitový krúžok	01-06-A4
Dištančný krúžok	01-07-A4
Závitová trubka	01-08-A4
Poistný plech	01-09-A4